



**COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE UN MOTOR DE
IGNICIÓN POR COMPRESIÓN CON SUSTITUCIÓN DE DIÉSEL-GAS NATURAL
A CONDICIONES AMBIENTALES DE BOGOTÁ**

SEBASTIAN CAMPUZANO GARCÍA

Cód. 065121039

**UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.**

2019



**COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE UN MOTOR DE
IGNICIÓN POR COMPRESIÓN CON SUSTITUCIÓN DE DIÉSEL-GAS NATURAL
A CONDICIONES AMBIENTALES DE BOGOTÁ**

SEBASTIAN CAMPUZANO GARCÍA

Cód. 065121039

**PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

Msc. ANDRÉS FELIPE ESLAVA SARMIENTO

DIRECTOR DEL PROYECTO

**UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.**

2019

Contenido

1	TITULO	10
2	INTRODUCCIÓN	10
2.1	Aplicaciones del Diésel como combustible	13
2.2	Gas Natural aplicado en motores de combustión interna	15
2.3	Aplicaciones de los motores de combustión interna	16
3	JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
4	OBJETIVOS	19
4.1	Objetivo general.....	19
4.2	Objetivos específicos.....	19
5	MARCO TEÓRICO.....	20
5.1	Combustible	20
5.2	Combustible Diésel	20
5.3	Gas natural vehicular.....	22
5.3.1	Características generales del gas natural	22
5.3.2	Aplicaciones.....	23
5.4	Motores de combustión interna.....	25
5.4.1	Factores de Desempeño de Motores Combustión Interna	25
5.4.2	Motor Diésel	28
5.4.3	Motores Ciclo Otto.....	29
5.4.4	Clasificación de motores de combustión interna	31
5.4.5	Características de funcionamiento de los motores reciprocantes	33
6	MARCO CONCEPTUAL.....	35
7	MARCO LEGAL Y NORMATIVO	36
8	ESTADO DEL ARTE.....	38
9	DISEÑO METODOLOGICO	42
9.1	Clase de investigación	42
9.2	Metodología	42
9.2.1	100% Diésel – 0% Gas natural	42
9.2.2	SUSTITUCION DIESEL – GAS NATURAL	44
9.3	Diseño de experimentos	45

9.3.1 Prueba piloto y superficies de respuesta.....	45
10 RESULTADOS Y ANALISIS	48
10.1 Datos obtenidos de las pruebas con las variaciones de carga y con combustible base Diésel	48
10.2 Cálculos con únicamente Diésel a partir de los datos de la carga al 100%	50
10.3 Resultados de la prueba con únicamente Diésel	52
10.4 Resultados del GNV a partir de los datos de la carga al 100%	54
10.5 Resultados de la sustitución Diésel – GNV	58
11 CONCLUSIONES	70
12 ANEXOS	72
12.1 Anexo A.....	72
REFERENCIAS	75

Lista de ecuaciones

<i>Ecuación 1. Trabajo W del motor.....</i>	<i>25</i>
<i>Ecuación 2. Trabajo específico del motor</i>	<i>26</i>
<i>Ecuación 3. Trabajo al freno</i>	<i>26</i>
<i>Ecuación 4. Presión media efectiva.....</i>	<i>26</i>
<i>Ecuación 5. Presión media efectiva al freno.....</i>	<i>27</i>
<i>Ecuación 6. Presión media efectiva indicada</i>	<i>27</i>
<i>Ecuación 7. Torque.....</i>	<i>27</i>
<i>Ecuación 8. Torque para motor de 4 tiempos.....</i>	<i>27</i>
<i>Ecuación 9. Potencia de un motor.....</i>	<i>28</i>
<i>Ecuación 10. Potencia</i>	<i>50</i>
<i>Ecuación 11. Torque.....</i>	<i>50</i>
<i>Ecuación 12. Caudal de combustible.....</i>	<i>51</i>
<i>Ecuación 13. Flujo de masa de combustible.....</i>	<i>51</i>
<i>Ecuación 14. Consumo específico de combustible al freno.....</i>	<i>51</i>
<i>Ecuación 15. Ecuación de gases ideales.....</i>	<i>55</i>
<i>Ecuación 16. Volumen específico.....</i>	<i>55</i>
<i>Ecuación 17. Ecuación de densidad</i>	<i>56</i>

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Propiedades del Diésel en Colombia.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2. Características físico químicas del gas natural</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 3. Características motor Diésel F210.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 4. Combinación de las variables de entrada.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 5. Prueba piloto</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 6. Superficies de respuesta para las variables de entrada con sustitución Diésel-GNV.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 7. Prueba con Diésel carga 100%.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 8. Prueba con Diésel carga 80%.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 9. Prueba con Diésel carga 60%.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 10. Prueba con Diésel carga 40%.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 11. Prueba con Diésel carga 20%.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 12. Cálculos para la prueba realizada con combustible base Diésel 100%.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 13. Datos prueba GNV carga 100%.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 14. Cálculos para la prueba realizada con combustible base GNV.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 15. Resultados de la sustitución con 95% Diésel y 5% GNV.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 16. Resultados obtenidos de la prueba con combustible DIESEL</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 17. Resultados obtenidos de la prueba con combustible GNV.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 18. Resultados obtenidos de la prueba con la sustitución Diésel – GNV.....</i>	<i>74</i>

Lista de figuras

<i>Figura 1. Demanda de Diésel.</i>	11
<i>Figura 2. Demanda de GNV.</i>	11
<i>Figura 3. Ventas gasolina (KBDC)</i>	14
<i>Figura 4. Ventas diésel (KBDC).</i>	14
<i>Figura 5. Ciclo Diésel. Diagrama de Presión Vs Volumen.</i>	29
<i>Figura 6. Ciclo Otto – Diagrama de Presión Vs Volumen</i>	30
<i>Figura 7. Motor F210.</i>	30
<i>Figura 8. Potencia al freno y Torque al freno de un motor típico reciprocante en función de la velocidad del motor.</i>	33
<i>Figura 9. BSFC en función de la velocidad del motor</i>	34
<i>Figura 10. Motor mono cilíndrico F210 de 4 tiempos</i>	43
<i>Figura 11. Combustible base Diésel.</i>	43
<i>Figura 12. Potencia Vs Carga (Diésel 100%)</i>	53
<i>Figura 13. Torque Vs Carga (Diésel 100%)</i>	53
<i>Figura 14. Consumo Vs Carga (Diésel 100%)</i>	54
<i>Figura 15. Potencia Vs Carga (GNV 100%)</i>	57
<i>Figura 16. Torque Vs Carga (GNV 100%)</i>	57
<i>Figura 17. Consumo Vs Carga (GNV 100%)</i>	58
<i>Figura 18. Curvas características de Potencia para la sustitución de Diésel - GNV.</i>	59
<i>Figura 19. Resultados de las pruebas de Potencia</i>	60
<i>Figura 20. Potencia vs mezcla / Potencia Vs Carga</i>	61
<i>Figura 21. Gráfica de superficie de respuesta de Potencia vs Carga; Mezcla</i>	62
<i>Figura 22. Optimización de la respuesta de Potencia [kW]</i>	62
<i>Figura 23. Curvas características de Torque para la sustitución de Diésel - GNV.</i>	63
<i>Figura 24. Resultados de las pruebas de Torque</i>	63
<i>Figura 25. Torque vs mezcla / Torque Vs Carga</i>	64
<i>Figura 26. Gráfica de superficie de respuesta del Torque vs Carga; Mezcla</i>	65
<i>Figura 27. Optimización de la respuesta de Torque [N*m]</i>	65
<i>Figura 28. . Curvas características de Consumo específico de combustible para la sustitución Diésel - GNV.</i>	66
<i>Figura 29. Resultados de las pruebas del BSFC</i>	67
<i>Figura 30. BSFC vs mezcla / BSFC Vs Carga</i>	67
<i>Figura 31. Gráfica de superficie de respuesta del BSFC vs Carga; Mezcla.</i>	68
<i>Figura 32. Optimización de la respuesta máxima del BSFC [Kg/kW * h]</i>	69
<i>Figura 33. Optimización de la respuesta mínima del BSFC [Kg/kW*h]</i>	69

Lista de acrónimos y símbolos

Símbolos

W	Potencia
T	Torque
°C	Grados centígrados
Hz	Hertz
S	Segundos
kW*h	Kilovatio por hora
kPa	Kilo pascales
kW	Kilo vatios
N*m	Newton por metro
KJ	Kilo Julio
ρ	Densidad
\dot{m}_f	Flujo de masa de combustible

Acrónimos

ACP	Asociación colombiana de petróleos
ACPM	Aceite combustible para motores
BDP	Barriles por día
BSFC	Consumo específico de combustible al freno
CO	Monóxido de carbono
CO2	Dióxido de carbono
GLP	Gas licuado del petróleo
GN	Gas natural

GNV	Gas natural vehicular
KBDP	Miles de barriles por día
MCI	Motor de combustión interna
MCI-SI	Motor de combustión interna de ignición por chispa
MCI-CI	Motor de combustión interna de ignición por compresión
MPCD	Millones de pies cúbicos por día
MTON	Millones de toneladas
NTC	Norma técnica colombiana
NO _x	Óxido de nitrógeno
OPEP	Organización de países exportadores de petróleo
PCD	Pies cúbicos por día
PM ₁₀	Partes por millón
RPM	Revoluciones por minuto
UPME	Unidad de planeación minero energética

1 TITULO

Comparación de parámetros de desempeño de un motor de ignición por compresión con sustitución de diésel-gas natural a condiciones ambientales de Bogotá.

2 INTRODUCCIÓN

El desarrollo constante de las ciudades en el mundo requiere de un alto consumo energético y unos de los más demandados forman parte de los combustibles fósiles como es el caso del diésel, el cual es muy utilizado en vehículos de transporte urbano y en aplicaciones industriales, teniendo en cuenta que conforme pasa el tiempo las reservas de este combustible se van agotando. (UPME, 2017)

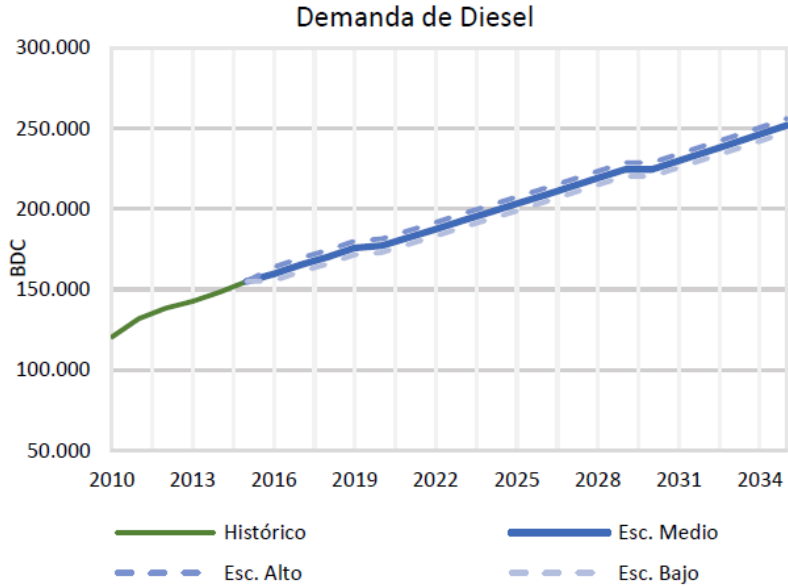
Por otro lado, en distintas partes del mundo también se utiliza el diésel y el gas natural para diversas aplicaciones, como por ejemplo en la generación de energía eléctrica, maquinaria agrícola, embarcaciones de pesca, calderas para calefacción, etc. (Gasoléo, s.f)

Por ejemplo, en México se está trabajando insistentemente en el refinamiento del Diésel como requisito indispensable para la introducción de nuevos motores de tecnología avanzada, queriendo reducir emisiones contaminantes a la atmosfera cubriendo la creciente demanda de este combustible en la industria del autotransporte. (Ibarra, 2009).

Por otro lado, en Perú se desarrolló un dispositivo experimental destinado a analizar los cambios en los parámetros de desempeño de un auto a base de gasolina modificándolo para trabajar con GLP (gas licuado de petróleo). Se evaluaron parámetros como presión, temperatura, emisiones, Potencia y Torque variando las RPM del motor, los resultados demostraron que tanto la temperatura se elevó considerablemente utilizando GLP, la presión en los cilindros se mantuvo medianamente constante y la Potencia y el Torque disminuyen con el GLP a las mismas condiciones de trabajo. (R. Lopez., J. Milón.)

A continuación, se muestran estudios estadísticos y proyecciones realizadas por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), donde los resultados obtenidos son producto de actualización del modelo técnico económico, el cual involucra en la proyección de los combustibles el comportamiento de productores de combustibles líquidos y de los consumidores, en relación con señales de ingresos, precios, tecnologías y demás políticas. (UPME, 2017)

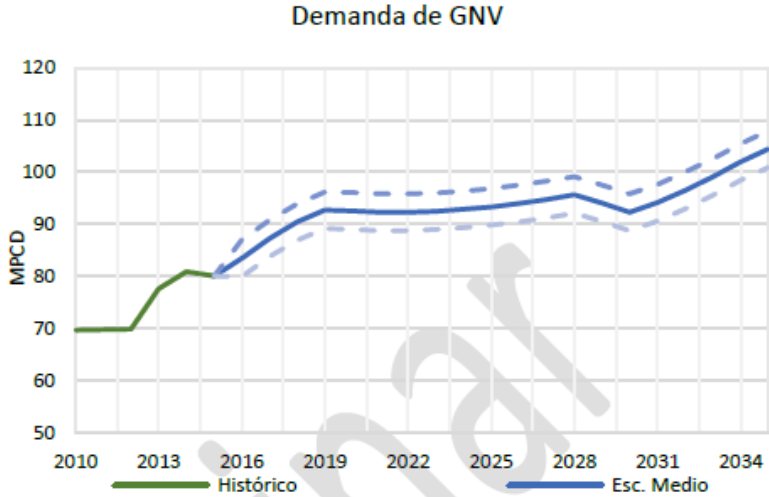
Figura 1. Demanda de Diésel.



Fuente. UPME. (2016). Proyección de demanda de combustibles líquidos en Colombia.

En la Figura 1 se muestra la proyección de la demanda del diésel y los escenarios bajo y alto alrededor del escenario medio. La demanda presenta una tasa de crecimiento promedio en el periodo de análisis comprendido entre el 2015 y el 2035 del 2,46% alcanzando una demanda de 251 kBDP (miles de barriles por día) para el 2035.

Figura 2. Demanda de GNV.



Fuente. UPME. (2016). Proyección de demanda de combustibles líquidos en Colombia.

Para el caso de la proyección de GNV en los escenarios bajo, medio y alto se muestra en la Figura 2, donde la tasa de crecimiento promedio de este combustible en el periodo de análisis (2015 - 2035) sería del 1,34%, alcanzando una demanda de 104MPCD (millones de pies cúbicos por día) en el 2035. (Valencia, J., Arturo, M., Acosta, L., Obando, D., 2016).

De las anteriores gráficas se conoce el promedio de crecimiento anual de la demanda de cada uno de estos combustibles en el periodo evaluado y se muestran a continuación:

- ACPM: 2.4%.
- GNV: 1.01%.

De los anteriores datos se puede saber que existirá un aumento en la demanda del diésel y el gas natural, lo cual lleva a pensar diferentes alternativas de combustibles que logren suplir la actual y futura demanda energética, como es el caso de los motores duales, los cuales utilizan un sistema de admisión de dos combustibles ya sean GLP (gas licuado del petróleo), biogás o gas natural. Un artículo publicado por la revista *INGENIUS*, da a conocer un proyecto que se centró en la reducción de la contaminación del aire desarrollando ciertas actividades dentro de las cuales estaba reemplazar un motor diésel en un banco de soporte para facilitar las pruebas y también se construyó un sistema de inyección de gas que inyecta GLP (gas licuado del petróleo) en el colector de admisión de forma dual. “Este sistema permite modificar sus parámetros logrando variar entre otros la cantidad de gas inyectada, esto facilita enormemente que se pueda realizar un sinnúmero de ensayos buscando el equilibrio entre el buen funcionamiento del motor y la disminución de gases contaminantes. En este punto es necesario aclarar que el motor trabaja siempre mediante el ciclo diésel”. (Chica, F., Espinoza, F., Rivera, N., s.f).

De tal manera este trabajo de investigación planea estudiar una sustitución efectiva entre diésel y gas natural en un banco pruebas con un motor de combustión interna Diésel de 210 c.c a condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá implementando una metodología de superficie de respuesta.

Las variables de experimentación serán 2 (carga del freno del banco de prueba y la sustitución de diésel y gas natural), y sus niveles de variación serán 4 (100%, 80%, 60% y 40%), teniendo en cuenta que se trabajara a 3600 Rpm constantes, los porcentajes de combustible se determinarán por análisis energético. Esta metodología ayudara a determinar cuál es la combinación de variables de tal manera que de una mejor o igual entrega de parámetros de desempeño al diésel en uso regular.

Por lo anteriormente mencionado es importante formular el siguiente interrogante:

¿Se pueden obtener iguales o mejores parámetros de desempeño de un motor de ignición por compresión de combustible base Diésel, con una sustitución de Diésel-Gas Natural a condiciones ambientales de Bogotá?

2.1 Aplicaciones del Diésel como combustible

Son obvias las razones por las cuales el mundo ha llegado al punto de depender de los beneficios que otorga el petróleo y los derivados como es el caso del combustible Diésel. La industria, el transporte, en la agricultura tractores y demás equipos, dependen casi que un 100% del petróleo y en razón al crecimiento del parque automotor en Colombia como consecuencia del crecimiento poblacional y económico, se han estado implementando acciones que ayuden a incrementar la producción de Diésel a nivel nacional, como resultado se ha dado un aumento en la demanda entre enero y agosto de 2017 del 5% en comparación con el aumento de la gasolina en ese mismo periodo que fue del 1%. (UPME, 2017)

Para el caso del Medio Oriente, China será la encargada de impulsar el crecimiento de la industria de refinación de petróleo crudo en Asia entre el 2018 y el 2023, aportando el 44% de la capacidad de refinación de petróleo para el 2023. En el 2018, la capacidad de refinación total de China fue de 15,994 MPD (miles de barriles por día), representando el 46% de la capacidad total de refinación en Asia para el año 2018. (Soorya Tejomoortula, 2019)

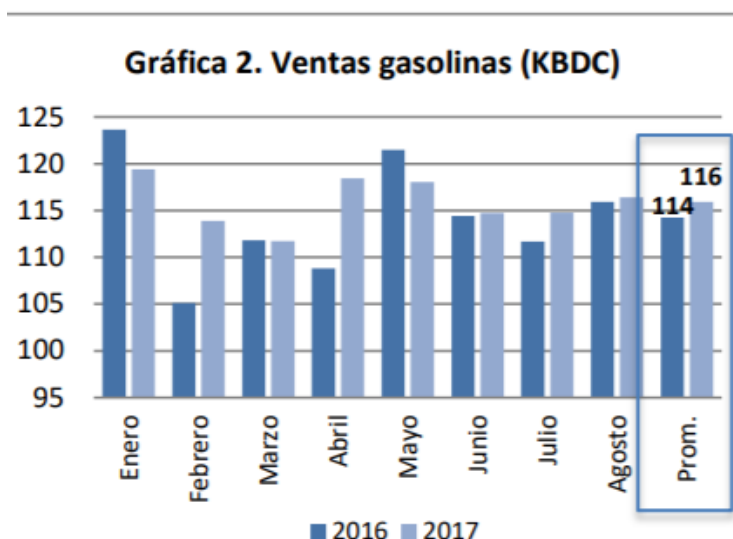
En el caso de Latinoamérica, Brasil y México producirían 230.000 BDP y 100.000 BDP respectivamente durante el mismo periodo y para el caso de Colombia con la restructuración de sus refinerías en Barrancabermeja y Cartagena tendría un aumento en su capacidad de refinación de 230.000 BDP.

Asimismo, según un boletín del DANE, las importaciones de combustibles líquidos entre enero y agosto del 2017 aumentaron en un 1.2% respecto al mismo periodo en el año 2016. (DANE, 2018)

Una consideración de la OPEP (organización de países exportadores de petróleo) es que para el año 2035 la capacidad de refinación de petróleo se habrá incrementado en 17,2 MBPD (millones de barriles por día) respecto al año 2012 por motivos que entre otros está el crecimiento en la demanda del Diésel y la gasolina. (OPEP, 2018).

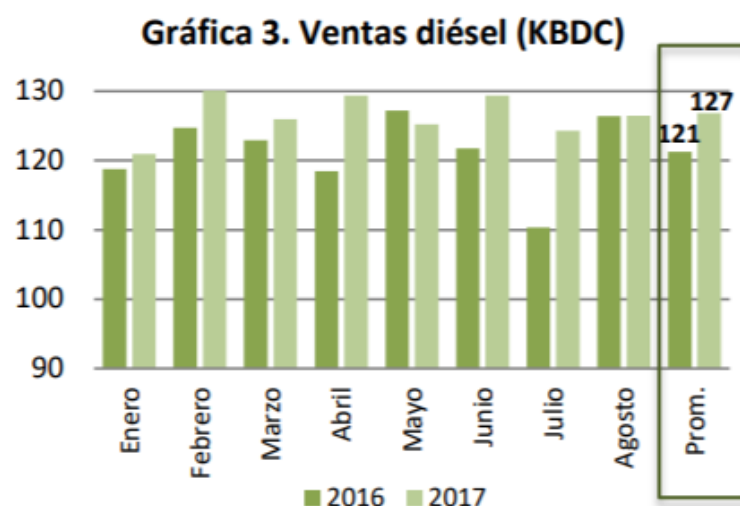
A continuación, se muestran datos recolectados por la ACP (Asociación Colombiana de Petróleo) donde se muestra el incremento en las ventas del Diésel comparado con la gasolina en el 2017 como se puede ver en la figura 3 y 4

Figura 3. Ventas gasolina (KBDC)



Fuente. ACP. (2017). Proyección de demanda de combustibles líquidos en Colombia.

Figura 4. Ventas diésel (KBDC)



Fuente. ACP. (2017). Proyección de demanda de combustibles líquidos en Colombia.

El mayor incremento en el consumo de diésel obedece en parte a una mayor estabilidad en materia de orden público. En 2016, especialmente en los meses de marzo, abril y junio, los bloqueos de vías y el paro camionero impactaron notoriamente el transporte de carga y, por ende, la demanda de este combustible.

Vale la pena mencionar que a nivel nacional el diésel mezclado con biodiesel representa 47% del total de combustibles consumidos, las gasolinas oxigenadas 43% y el jet fuel 10%. (ACP, 2017)

En cuanto a los precios de referencia en estaciones de servicio, el precio publicado por el Ministerio de Minas y Energía para la gasolina corriente oxigenada en Bogotá, aumentó de diciembre de 2016 a noviembre de 2017 en un 9%, pasando de 8.045 \$/gal a 8.750 \$/gal² y para el caso del diésel en Bogotá el aumento fue de 7%, pasando de 7.500 \$/gal en diciembre de 2016 a 8.038 \$/gal en octubre de 2017. Esta variación estuvo marcada especialmente por cambios en los impuestos. (ACP, 2017).

También es pertinente tener en cuenta que los vehículos que más contaminan utilizan diésel el cual es un hidrocarburo líquido que se obtiene principalmente de la destilación del petróleo, como lo son los camiones de carga pesada y los buses de transporte público los cuales representan la categoría vehicular más importante en la ciudad en términos de emisiones contaminantes, como lo determina un artículo de la universidad de los Andes en Bogotá, “a pesar de representar menos del 5% del total de vehículos en la ciudad, los buses generan 50% de las emisiones de PM_{10} , cerca del 30% de las emisiones de CO y 40% de las emisiones de NO_x .” Y llegaron a la siguiente conclusión: “Se determinó que el mejoramiento de la calidad de los combustibles diésel es la mejor estrategia para la reducción de las emisiones de PM_{10} , (partes por millón) en Bogotá.”. (Giraldo, L., Behrentz, E., s.f).

2.2 Gas Natural aplicado en motores de combustión interna

Debido a las grandes reservas mundiales de gas natural se está realizando cada vez más investigación y desarrollo para el uso de este combustible alternativo en motores de encendido por chispa y de compresión.

Por lo mismo se han desarrollado diversas investigaciones, por ejemplo, la implementación de modelos predictivos de combustión de mezclas de GNV en motores (SI) encendidos por chispa y (CI) encendidos por compresión, el modelo, además de permitir estudiar la combustión de diferentes composiciones de los componentes del gas natural, facilita evaluar la combustión en presencia de aire seco y húmedo. Se muestran los resultados de la validación con datos experimentales demostrando precisión y exactitud en los resultados que arroja el programa. Se presentan resultados de presión en el cilindro, temperatura en las zonas de mezcla de 2678 K (a 400° del cigüeñal) y 1260 K (a 350° aproximadamente del cigüeñal) sin quemar y quemada, fracción de masa quemada y calor de reacción de la combustión para el motor modelado usando una mezcla de gas natural. (Henry, E., 2007).

También se han implementado modelos para el dimensionamiento de mezcladores de aire-gas natural para motores donde se tiene como objetivo no solo servir de guía para fabricantes sino también emplearlo como una herramienta para la selección adecuada de mezcladores en función del tipo de motor. El sistema de

alimentación de aire y combustible de un motor de combustión interna es determinante en su desempeño, ya que de este se desprende gran parte del proceso de combustión. En el momento de hacer una conversión a GN, la cual da al motor la característica de bi-combustible (Gasolina, ACPM o gas), se centran dispositivos en el sistema de admisión que claramente afectan la alimentación del motor. En un trabajo reciente desarrollado en la Universidad de Antioquia se ha investigado el desempeño de un motor convertido a GN en el cual los resultados muestran que las instalaciones inapropiadas de los componentes de un conjunto pueden dar lugar a una pérdida importante en cuestiones de Potencia y Torque, la cual se hace más acentuada con gas natural a partir de 3.200 RPM, además se pudo observar la marcada influencia del mezclador aire-GN en el desempeño del motor. (Jhon, R. Ricardo, M., 2002)

2.3 Aplicaciones de los motores de combustión interna

Los motores de combustión interna son máquinas reciprocantes que convierten la energía química de un combustible en energía mecánica mediante un ciclo termodinámico. Los motores de combustión interna (MCI) más comunes son los de encendido por chispa (SI) los cuales funcionan mediante el ciclo Otto y los encendidos por compresión (CI) que funcionan con ciclo Diésel. (Mercedes, Yolanda., Hernández, Andrés, 2014)

Los MCI presentan bastantes ventajas ya que facilitan su empleo en distintas aplicaciones como por ejemplo en la industria del transporte tanto terrestre como marítimo, en el sector agrícola, para plantas generadores de energía, etc. (Gasoléo, s.f)

En su gran mayoría los motores de combustión interna de encendido por chispa MCI-SI funcionan a base de gasolina y están destinados para el uso de vehículos de transporte particular, por otro lado, los MCI-CI funcionan con combustibles más pesados, el más usado es el Diésel, y se utilizan generalmente en vehículos de transporte de carga pesada y de pasajeros.

En efecto, de los MCI los más eficientes son los CI que funcionan con ciclo Diésel, su eficiencia térmica al freno es cercana al 34% en comparación con los impulsados con ciclo Otto que es alrededor del 30%. En cuanto a las emisiones contaminantes reguladas para MCI como son: CO, CO₂, NO_x y PM, son menores en un SI que en un CI. Principalmente cuando la mezcla llega completamente homogénea a la cámara de combustión (en un CI), genera más emisiones gaseosas y solidas causantes de enfermedades, principalmente respiratorias e incluso cáncer. (Eslava, A., 2014).

De igual forma en la actualidad en la actualidad se trabaja con tecnologías que ayuden a mitigar el impacto de las emisiones contaminantes mejorando los procesos, como es el caso de la conversión a sistemas de alimentación duales que utilizan dos combustibles, principalmente uno líquido y uno gaseoso, por ejemplo, Diésel-GLP o Diésel-GNV. (Eslava, A., 2014).

Los MCI tienen un amplio campo de acción, entre los que se encuentran:

- Industria del transporte; aquí podemos encontrar lo que se refiere a transporte por carretera, como automóviles particulares y motocicletas, también vehículos de carga pesada (autobuses, camiones, etc).
- En la industria agrícola, como son cosechadoras, motobombas, tractores, etc.
- Máquinas de obra pública o civil, como retroexcavadoras, etc.
- En la industria aérea (aviones pequeños).
- Industria férrea.
- Plantas de generación de energía eléctrica y térmica.
- Bombas, turbinas, compresores, etc.
- Industria naval (propulsión marina).

La aplicación en la industria aérea de los MCI está limitada a aviones pequeñas donde su velocidad de vuelo no supere un Mach 0,6 y donde su potencia no sea mayor de 300 kW. En cuanto a la propulsión de los vehículos terrestres, la respuesta de los MCI ha sido eficaz, cumpliendo las necesidades básicas en cuanto a potencia y autonomía por unidad de peso, respondiendo a su vez a la creciente demanda en cuanto a la reducción de consumo de combustible y emisiones a la atmosfera lo que ha acelerado el desarrollo de los MCI. (J. Heywood, 1988)

3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La presente investigación se centrará en desarrollar una mezcla efectiva entre diésel y gas natural comparando los parámetros de desempeño entre el diésel y una sustitución de Diésel-Gas Natural (Torque, Potencia y Consumo específico), con el fin de generar una nueva opción de generación de energía, que posiblemente tenga iguales o mejores características de rendimiento que la actual base de Diésel usada.

De igual forma se han hecho previas investigaciones de compuestos que también pueden ser utilizados como combustibles para la mezcla con diésel, como lo es el GLP (gas licuado del petróleo), el cual tiene un consumo menor que el gas natural como lo informa la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética): “Sin embargo, y de forma paralela, la demanda de este combustible se ve afectada negativamente por el acelerado avance en la masificación del gas natural, soportado en una estructura regulatoria más sólida que se ha perfeccionado con el crecimiento mismo

del sector de gas natural (GN).”, también dan a conocer la producción mundial del GLP siendo esta de 281 MTON, “durante el 2014 fue de 281 MTON año distribuido porcentualmente así: el 62% del total producido, proviene del procesamiento del gas natural y 38% de refinamiento de crudos; en el año 2015 la producción mundial llegó a 292.4MTON.” (Valencia J. , 2017).

Con relación a el GLP, el gas natural tiene un consumo más alto por lo cual la sustitución entre el diésel y el gas natural podría ser mejor con respecto a la demanda de estos combustibles, además se tiene en cuenta que en Bogotá los automóviles emplean motores duales, lo que quiere decir que utilizan el gas y el diésel de forma independiente sin mezclarlo. Asimismo es pertinente tener en cuenta que los vehículos que más contaminan utilizan diésel, como lo son los camiones de carga pesada y los buses de transporte público los cuales representan la categoría vehicular más importante en la ciudad en términos de emisiones contaminantes, como lo determina un artículo de la universidad de los Andes en Bogotá, “a pesar de representar menos del 5% del total de vehículos en la ciudad, los buses generan 50% de las emisiones de PM_{10} , cerca del 30% de las emisiones de CO y 40% de las emisiones de NO_x .” Y llegaron a la siguiente conclusión: “Se determinó que el mejoramiento de la calidad de los combustibles diésel es la mejor estrategia para la reducción de las emisiones de PM_{10} (partes por millón de material particulado) en Bogotá.”. (Giraldo, L., Behrentz, E., s.f).

La aplicación y procedimiento de la investigación sobre motores se basará en lo estipulado en la NTC (Norma Técnica Colombiana), y en vista de que no se han hecho este tipo de experimentaciones, se pretende crear una metodología que sirva al empoderamiento de los laboratorios de motores y línea térmica del programa de Ingeniería Mecánica.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Comparar los parámetros de desempeño de un motor de ignición por compresión con sustitución de diésel-gas natural a condiciones ambientales de Bogotá.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar los Parámetros de Desempeño de un motor de combustión interna empleando como combustible **únicamente diésel** (torque, potencia y consumo específico de combustible), sometido a la carga de un banco de resistencias a determinados porcentajes de la carga máxima (20%,40%, 60%, 80% y 100%).
- Determinar los Parámetros de Desempeño de un motor de combustión interna empleando como combustible **una sustitución entre diésel y gas natural** (torque, potencia y consumo específico de combustible), sometido a la carga de un banco de resistencias a determinados porcentajes de la carga máxima (20%,40%, 60%, 80% y 100%).
- Determinar las curvas de potencia, torque y consumo específico de un motor de combustión interna operando con sustitución de diésel y gas natural.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 Combustible

Es un carburante, por lo general un hidrocarburo volátil que al ser quemado puede producir energía, calor o luz.

5.2 Combustible Diésel

Es una mezcla de hidrocarburos entre el 96 y el 98% compuesto alrededor de 10 y 28 átomos de carbono producido en refinerías, también conocido como gasóleo y es obtenido a partir de la destilación y purificación del petróleo crudo, empleado en motores de ciclo diésel. (Ecopetrol, s.f) .

Perfeccionado por el ingeniero Rudolf Diésel en 1882, mejoró su encendido por compresión incluyendo combustibles sólidos.

Denominado también como gasoil o gasóleo, es un combustible líquido con un color blancuzco, su densidad es de 850 kg/m³ y su composición son básicamente parafinas. Su poder calorífico es de 8.800 kcal/kg y es utilizado principalmente como combustible para motores Diésel y en calefacción. (Gasoléo, s.f)

El Diésel es obtenido de la producción de las refinerías nacionales o importado. Se puede obtener de diferentes procesos de refinación del petróleo como:

- Destilación atmosférica
- Ruptura catalítica e hidrocraqueo de gasóleo
- Transesterificación del aceite de palma con metanol (biodiesel 2% / 4%)

Es clasificado como un líquido de tipo inflamable clase II según la norma 321 de la NFPA (National Fire Protection Association).

Tabla 1. Propiedades del Diésel en Colombia

Propiedades	Unidades	Especificación	
		Mínimo	Máximo
Agua y sedimento	mL/ 100 mL		0,05
Azufre	mg/ kg		50
Contenido de aromáticos	mL/ 100 mL		35
Cenizas	g / 100 g		0,01
Contenido de biocombustible	mL/ 100 mL	1,6	2,2
Color ASTM	--		3
Índice de cetano	N/A	45	
Número de cetano	N/A	43	
Punto de fluidez	°C		3
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² / s	1,9	5
Estabilidad térmica	% de reflectancia	70% a 90 minutos	
Estabilidad a la oxidación	g / 100 mL		25
Lubricidad a 60°C	Micrómetros		450

Fuente. (Ecopetrol, s.f)

En la tabla 1 se muestran las propiedades del combustible Diésel en Colombia, datos que han sido compilados por Ecopetrol, mencionando que el diésel corriente ha sido diseñado para usarse en motores tipo diésel, en automotores de trabajo pesado y de trabajo medio que requieren altas exigencias tanto en vías como en carreteras del país.

También es empleado en máquinas de tipo diésel que se requieran fuera de la carretera, en la industria de explotación minera, de construcción, naval, agropecuaria, etc.

Asimismo, el diésel puede ser empleado como combustible para generar energía tanto eléctrica como mecánica y en secadores, hornos y calderas.

5.3 Gas natural vehicular

Se obtiene de yacimientos naturales en de gas natural o paralelamente de la explotación petrolífera. En los depósitos geográficos los materiales orgánicos pasaron a convertirse en petróleo (crudo), carbón, gas natural, GLP y aceites pesados. Todo esto como resultado de la descomposición de animales y plantas que estuvieron expuestos a diferentes condiciones de presión y temperatura dentro de la capa terrestre por millones de años. (Ormeño, Victor, 2015)

El gas natural se puede encontrar no asociado (solo), disuelto o asociado (se encuentra acompañado de petróleo crudo o carbón). En su composición se encuentra principalmente metano en un 90% aproximadamente, acompañado de otros gases como:

- Etano
- Nitrógeno
- Etano
- CO_2
- Propano
- Metano
- Butano
- Otros

Este tipo de composición es responsable de que el gas natural sea un combustible más limpio en comparación con los derivados del petróleo. (Ormeño, Victor, 2015)

5.3.1 Características generales del gas natural

El gas natural se lleva a los diferentes consumidores (como estaciones de servicio para vehículos con motores duales, para el hogar e incluso para la industria), a través de tuberías o redes de conductos siendo esta la manera más efectiva de transportar este gas de manera segura a mercados de demanda continua a bajas y altas presiones.

Una ventaja de este hidrocarburo es que es más económico que el GLP, lo cual permite la instalación y los ductos sin incrementar demasiado su precio final.

- Color y olor: Es inodoro e incoloro en su estado natural, pero para su seguro transporte se le adiciona etil mercaptano, el cual permite su detección ante una posible fuga
- Peso: Es más liviano que el aire, esto quiere decir que ante cualquier fuga se disipa rápidamente. Las gravedades específicas del gas y del aire son de 0.6 y 1,00 respectivamente

- Auto ignición: La temperatura adecuada para que este hidrocarburo produzca auto ignición es de 537°C.
- Combustión: Su combustión crea una llama de color azul bien definido, cuando es amarillo, naranja o rojiza es señal de una mala combustión del gas natural.

Tabla 2. Características físico químicas del gas natural

PROPIEDAD	GAS NATURAL
Composición	90% metano
Formula química	CH_4
Gravedad específica (vapor)	0,6
Poder calorífico	9200 kcal/m ³
Presión de suministro	21 mbar
Estado físico	-Gaseoso sin límite de composición - Liquido a -160°C y a presión atmosférica
Color/olor	Incoloro/inodoro

Fuente. (Ormeño, Víctor, 2015)

5.3.2 Aplicaciones

El gas natural es un combustible versátil y a su vez económico y se puede utilizar como combustible en diferentes ámbitos, por ejemplo:

- Industria del transporte
- Actividades domésticas
- A nivel comercial
- Industria Metalmecánica y petroquímica

Industria del transporte

El gas natural es utilizado como (GNV) en motores de combustión interna en Colombia ya que es más barato y limpio que otros combustibles empleados para lo mismo, logrando reemplazar en algunas ocasiones a los combustibles tradicionales como el ACPM o la gasolina. (Montenegro, Carlos, 2011)

Sector residencial

El GN es empleado en todo tipo de cocción de alimentos, hornos de gas, climatización en sistemas de aire acondicionado, sistemas de calefacción, para el secado de la ropa, etc.

Sector comercial

Es utilizado ampliamente en diferentes espacios: panaderías, hoteles, hospitales, lavanderías, clínicas, saunas, baños turcos, colegios, restaurantes, etc.

Sector industrial

El gas natural es utilizado ampliamente en industrias que produzcan acero o que requieran de calderas industriales para calentar agua o metal.

- Industria de alimentos: Es utilizado como combustible para generar energía calórica en diferentes procesos, ya sea para esterilización, pasteurización, secado, etc.
- Industria textil: Es utilizado en el calentamiento directo en equipos por convección forzada para secado, calentamiento por radiación, etc.
- Industria del vidrio: El GN es utilizado en quemadores que a través de su llama transmiten energía calórica a la masa del cristal de forma eficiente.
- Fundición de metales: El gas natural es utilizado ampliamente en todo tipo de procesos metalúrgicos.
- Industria de cerámicas: El gas natural ha permitido la creación de piezas de mejor calidad a costos más bajos.
- Industria del cemento: Las cementeras se han visto afectadas positivamente con la utilización del gas natural haciendo más eficientes los hornos y alargando su vida útil, además de bajos costos de mantenimiento y gases de combustión menos contaminantes.
- Cogeneración: En la cogeneración se produce de forma simultánea energía térmica y eléctrica, utilizando únicamente como combustible el gas natural. (Ormeño, Victor, 2015)

Industria eléctrica

En la industria eléctrica el gas natural logra sustituir con grandes ventajas tanto económicas como ambientales a otros combustibles fósiles, ya sea el carbón el ACPM o el petróleo residual, tanto en centrales de ciclo simple o en ciclos combinados. Esto da como resultado un suministro eléctrico a menores tarifas.

Industria petroquímica

En esta industria, el gas natural se utiliza como materia prima para diferentes procesos químicos e industriales. De una forma más económica y relativamente fácil

se logra convertir en hidrogeno, etileno o metanol, para usarlo en la producción de plásticos y fertilizantes. (Ormeño, Victor, 2015)

5.4 Motores de combustión interna

Máquina capaz de transformar cualquier tipo de energía en energía mecánica, siendo el combustible de trabajo el mismo al que se somete a la combustión para generar la energía al interior del cilindro.

Existen 2 tipos de motores de combustión interna de ignición por chispa (MCI), los reciprocantes y los rotativos entre los cuales están los motores Wankel para los rotativos y una variedad más grande para los reciprocantes como los Otto y Diésel como los más representantes.

5.4.1 Factores de Desempeño de Motores Combustión Interna

Teniendo en cuenta las características funcionales que corresponden a los MCI se encuentra el trabajo (W) el cual es la salida del motor el cual es generado por los gases de combustión en los cilindros, resultado que se obtiene de la fuerza actuando por la distancia.

$$W = \int F dx = \int P A_p dx$$

$$W = \int P dV$$

Ecuación 1. Trabajo W del motor (Pulkrabek, 2007)

Siendo P la presión en la cámara de combustión.

A_p es el área del pistón

x es la distancia de la carrera del pistón

dV es el volumen de desplazamiento del cilindro

Analizando los ciclos del motor por unidad de masa (m) dentro del cilindro se obtiene el trabajo específico (w), de tal manera reemplazando el volumen (V) por el volumen específico (v) y el trabajo W por el trabajo específico se obtiene:

$$w = \frac{W}{m}$$

$$w = \int p dV$$

Ecuación 2. Trabajo específico del motor (Pulkrabek, 2007)

Teniendo en cuenta que debido a las cargas parásitas del motor y a la fricción el trabajo entregado por el cigüeñal es menor que el trabajo indicado; entre las cargas parásitas están la bomba de aceite el compresor de aire acondicionado, el sobre alimentador, el alternador, etc. Teniendo en cuenta lo anterior el trabajo real disponible por el cigüeñal es el trabajo al freno W_b :

$$W_b = W_i - W_t$$

Ecuación 3. Trabajo al freno (Pulkrabek, 2007)

Siendo W_i el trabajo específico indicado generado por la cámara de combustión

Y W_t son las pérdidas por fricción y cargas parásitas.

Ahora bien, como la presión de los cilindros siempre está variando, genera un ciclo, por esto es importante medir la presión efectiva (mep).

$$w = (mep)\Delta v$$

$$\Delta v = v_{BDC} - v_{TDC}$$

$$mep = \frac{W}{\Delta v} = \frac{W}{V_D}$$

Ecuación 4. Presión media efectiva (Pulkrabek, 2007)

Siendo W el trabajo en un ciclo

w es el trabajo específico en un ciclo

V_d es el volumen desplazado

Ya calculada la presión media, es necesario calcular la presión media efectiva al freno (BMEP), esta relaciona el trabajo real que entrega el motor por el volumen de desplazamiento.

$$bmep = \frac{W_b}{\Delta b}$$

Ecuación 5. Presión media efectiva al freno (Pulkrabek, 2007)

Una vez se ha calculado la presión media efectiva, se calcula la presión constante que hay en cada carrera de potencia del motor, a esto se le llama presión media efectiva indicada

$$imep = \frac{bmep}{n}$$

Ecuación 6. Presión media efectiva indicada (Pulkrabek, 2007)

Siendo n la eficiencia del motor

Para calcular el torque, el cual tiene la capacidad para producir un trabajo siendo definido como un momento de fuerza que actúa por una distancia se necesita conocer el número de revoluciones por minuto n , el trabajo al freno W_b y el volumen desplazado V_d , de lo cual se tiene la siguiente ecuación:

$$2\pi T = W_b \frac{bmep V_d}{n}$$

Ecuación 7. Torque (Pulkrabek, 2007)

Ahora para un motor de 4 tiempos se tiene la siguiente formula:

$$T = W_b \frac{bmep V_d}{4 \pi}$$

Ecuación 8. Torque para motor de 4 tiempos (Pulkrabek, 2007)

Como consiguiente es necesario calcular la potencia del motor \dot{W} el cual se define como una tasa de trabajo del motor siendo n el número de revoluciones por ciclo y N la velocidad del motor:

$$(\dot{W}) = \frac{N}{n}$$

$$(\dot{W}) = 2\pi NT = T\omega$$

Ecuación 9. Potencia de un motor (Pulkrabek, 2007)

Ahora bien, para un motor de 4 tiempos donde se toman 2 revoluciones por ciclos, la potencia se calcula con la siguiente formula:

$$(\dot{W}) = (mep) \frac{A_p \bar{U}_p}{2}$$

Donde A_p es el área de la cara de los pistones y \bar{U}_p es la velocidad promedio del pistón.

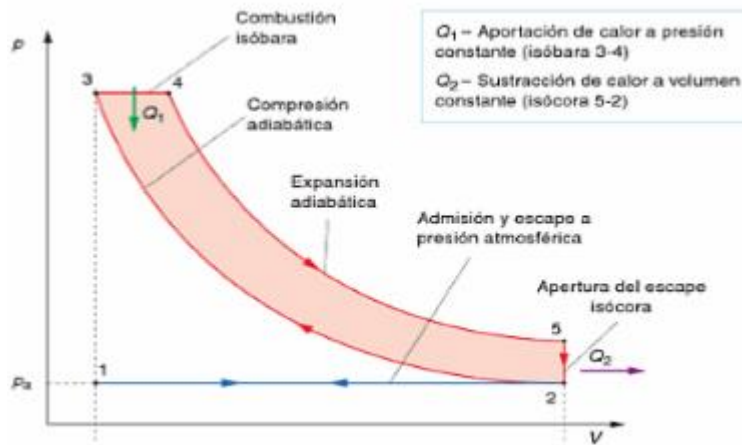
5.4.2 Motor Diésel

El motor diésel es un motor térmico que tiene combustión interna alternativa y se produce por la auto-ignición del combustible debido a altas temperaturas derivadas de la alta relación de compresión que posee, según el principio del ciclo del diésel.

Fue diseñado por el alemán Rudolf Diésel y es un motor de 4 tiempos, este proceso de combustión se realiza gracias a la compresión realizada durante el ciclo termodinámico donde se tiene una entrada de calor a presión constante, esta es la razón por la cual estos motores son conocidos como motores de encendido por compresión (MCI-EC); estos motores son más ruidosos, grandes y pesados, además tienen la capacidad de operar con combustibles pesados como el gasóleo o popularmente conocido combustible Diésel.

El F 210 es un motor diésel de 4 tiempos de inyección directa, refrigerado por aire y de arranque manual. Este motor es usado ampliamente en la industria, la agricultura y maquinas auxiliares marinas.

Figura 5. Ciclo Diésel. Diagrama de Presión Vs Volumen



Fuente. (Quintero, C., Moreno, Saul., 2014)

En el diagrama del ciclo Diésel de presión vs volumen se pueden ver los procesos señalados, estos son considerados reversibles y el fluido de trabajo es un gas ideal:

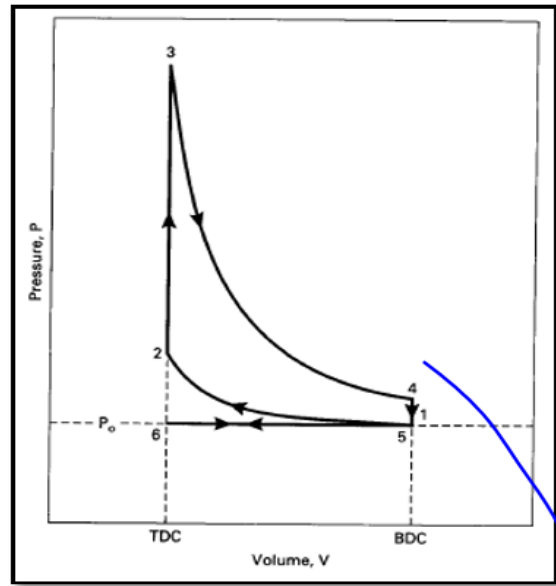
- En el proceso desde 1 hasta 2 se realiza una compresión adiabática, se adiciona trabajo al sistema de forma isentrópica.
- En el proceso desde 2 hasta 3 se adiciona calor a volumen constante, aquí se transmite calor al sistema de forma isobárica (a presión constante), variando el volumen del sistema debido a que se inyecta combustible.
- En el proceso que va desde 3 hasta 4 se realiza una expansión adiabática irreversible, así el sistema entrega trabajo de forma isentrópica.
- Por ultimo en el proceso que va de 4 a 1 se transmite el calor del sistema hacia el medio ambiente de forma isocórica (volumen constante), todo esto ocurre en el momento que se abre la válvula de escape.

El diagrama del ciclo teórico Diésel ayuda a seguir la evolución de la presión y la temperatura durante dentro del cilindro durante el funcionamiento de los MCI durante los 4 tiempos. (Quintero, C., Moreno, Saul., 2014)

5.4.3 Motores Ciclo Otto

Diseñados por Nikolaus August Otto, estos motores se diferencian de los Diésel porque requieren de una chispa producida por las bujías para provocar la ignición, razón por la cual se conocen como motores de ignición por chispa (MCI-EP), se distinguen por ser principalmente motores de 4 tiempos (admisión, explosión, compresión y escape) y operan regularmente con gasolina o combustibles gaseosos como GLP o Gas natural vehicular.

Figura 6. Ciclo Otto – Diagrama de Presión Vs Volumen



Fuente. (Pulkrabek, 2007)

El F 210 es un motor diésel de 4 tiempos de inyección directa, refrigerado por aire y de arranque manual. Este motor es usado ampliamente en la industria, la agricultura y maquinas auxiliares marinas.

Figura 7. Motor F210



Fuente. Autor del proyecto

Tabla 3. Características motor Diésel F210

CARACTERISTICAS MOTOR DIESEL F 210									
MODELO	EJE DE CUÑA	RPM	DESP (c.c)	POTENCIA MAXIMA (HP)	CONSUMO DE COMBUSTIBLE	CAPACIDAD DE TANQUE	ACEITE LUBRICANTE	PESO SECO	DIMENSION ES (mm)
F 210	19,0 mm	3600	210	4,7	0,9 Lt/h	2,5 Lt	0,75 Lt	27 kg	335*380*415

Fuente. Autor del proyecto

5.4.4 Clasificación de motores de combustión interna

Es posible clasificar también los MCI por sus diferentes parámetros, como por ejemplo la manera de suministrar el combustible a la cámara de combustión. Los motores de encendido provocado (EP) comenzaron utilizando el llamado carburador, dispositivo diseñado por el ingeniero alemán Benz, el cual funciona por efecto del principio Venturi, es decir, que una corriente de aire arrastra el combustible previamente almacenado en el suministro de almacenamiento del carburador y lo lleva hasta la cámara de combustión. Esto garantiza que la mezcla aire combustible sea homogénea; actualmente el carburador se encuentra obsoleto gracias al avance de la electrónica dando paso a otro tipo de sistema de suministro como lo es el sistema de inyección. (Jovaj, 1982.)

De igual manera los sistemas de inyección tienen dos formas para suministrar el combustible, indirecta y directamente:

- Indirecta: abastece el combustible antes de la válvula de admisión un sitio del motor llamado pre cámara, la cual permite que pase el aire y se mezcle con el combustible, este tipo de sistema de inyección es utilizado en los motores diésel. También se conoce como inyección indirecta a la inyección mono punto y multipunto, las cuales se realizan en un solo sitio o en diferentes puntos respectivamente.
- Directa: Se realiza justo después de la válvula de admisión lo que significa que esta se realiza directamente en la cámara de combustión. (J. Heywood, 1988)

De igual forma los motores se pueden clasificar por su sistema de aspiración de aire, puesto que existen motores turbo cargados y de aspiración natural. Los motores de aspiración natural, succionan aire por la acción de los pistones en el motor, en tanto que los turbo cargados están dotados con un sistema de turbina-compresor, el cual es activado gracias a los gases de escape, esto permite que el motor aspire más aire y trabaje de manera más eficiente; los motores turbo cargados son más comunes en autos deportivos y en motores de combustión interna de encendido por compresión. (Jovaj, 1982.)

También es posible clasificar los motores por su sistema de refrigeración puesto que existen motores refrigerados por aire y refrigerados por agua.

De igual forma, hay que tener en cuenta la importancia del motor de 2 tiempos. Este tipo de motores tiene los mismos procesos de operación que los de 4 tiempos (admisión, compresión, explosión y escape), la diferencia es que los realiza en una sola vuelta del cigüeñal.

Una de las principales ventajas de los motores de 2 tiempos con respecto a los motores de 4 tiempos es que en teoría proporciona más potencia, además de su simplicidad mecánica haciendo estos motores relativamente menos costosos y económicos. (Jovaj, 1982.)

Asimismo es necesario mencionar las principales desventajas de los motores de 2 tiempos como son el bajo aprovechamiento del ciclo de trabajo y el aumento de emisiones de hidrocarburos comparado con los motores de 4 tiempos, ya que estos motores no separan los procesos de admisión y escape y la carrera del motor es menor, llevándolos a desaparecer poco a poco del campo de los MCI presentando mayores pérdidas energéticas y altos niveles de contaminación en comparación con los motores de 4 tiempos. (W, Pulkrabek, 2007)

También es posible clasificar a los MCI por su disposición de cilindros, pueden ser reciprocantes con configuración en V, en línea o en W. También pueden ser rotativos como el motor Wankel.

Es posible clasificarlos también por el diseño y ubicación de las válvulas. Los MCI pueden tener válvulas bajo la cabeza o sobre la cabeza, rotatorias, puertos en la camisa del pistón o en lados opuestos.

Según el tipo de combustible, existen motores que usan hidrocarburos como gasolina y gasóleo, gas natural y GLP (gas licuado del petróleo), alcoholes, hidrogeno o de forma dual.

De igual forma se pueden clasificar por el método de ignición de la mezcla, como lo son los de encendido por chispa para el caso de los motores de ciclo Otto y los de encendido por compresión como los motores Diésel.

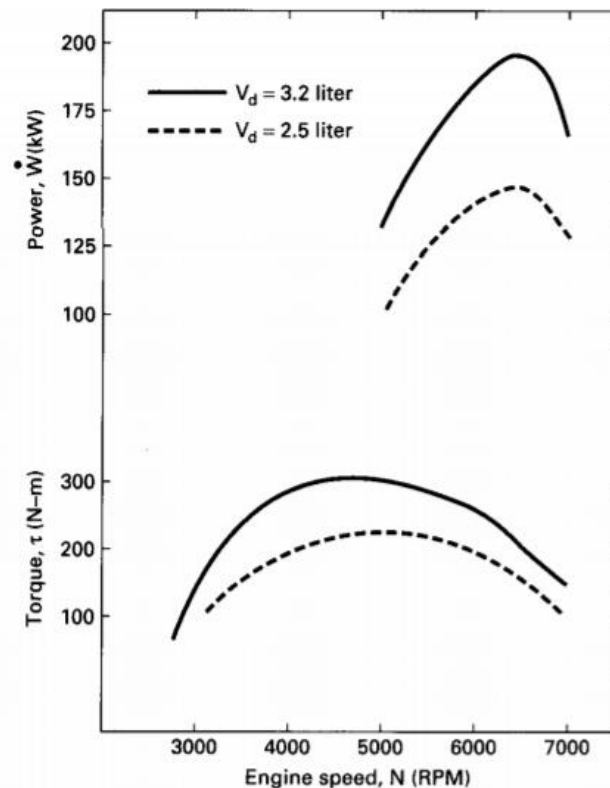
5.4.5 Características de funcionamiento de los motores recíprocentes

Muchos motores de los automóviles modernos tienen un torque máximo en el rango entre 200 a 300 N-m y velocidades entre los 4000 y 6000 RPM. El punto de torque máximo se llama velocidad máxima de torque al freno MBT.

Uno de los objetivos principales en el diseño de un motor de automóvil moderno es lograr “aplanar” la curva de Torque Vs Velocidad (figura 8) y tener un torque alto y una baja velocidad.

Ahora bien, los motores CI por lo general tienen un mayor torque que los motores SI, al igual que los grandes motores logran tener valores de torque altos con MBT a velocidades relativamente bajas. (Pulkrabek, 2007)

Figura 8. Potencia al freno y Torque al freno de un motor típico recíprocante en función de la velocidad del motor



Fuente. (Pulkrabek, 2007)

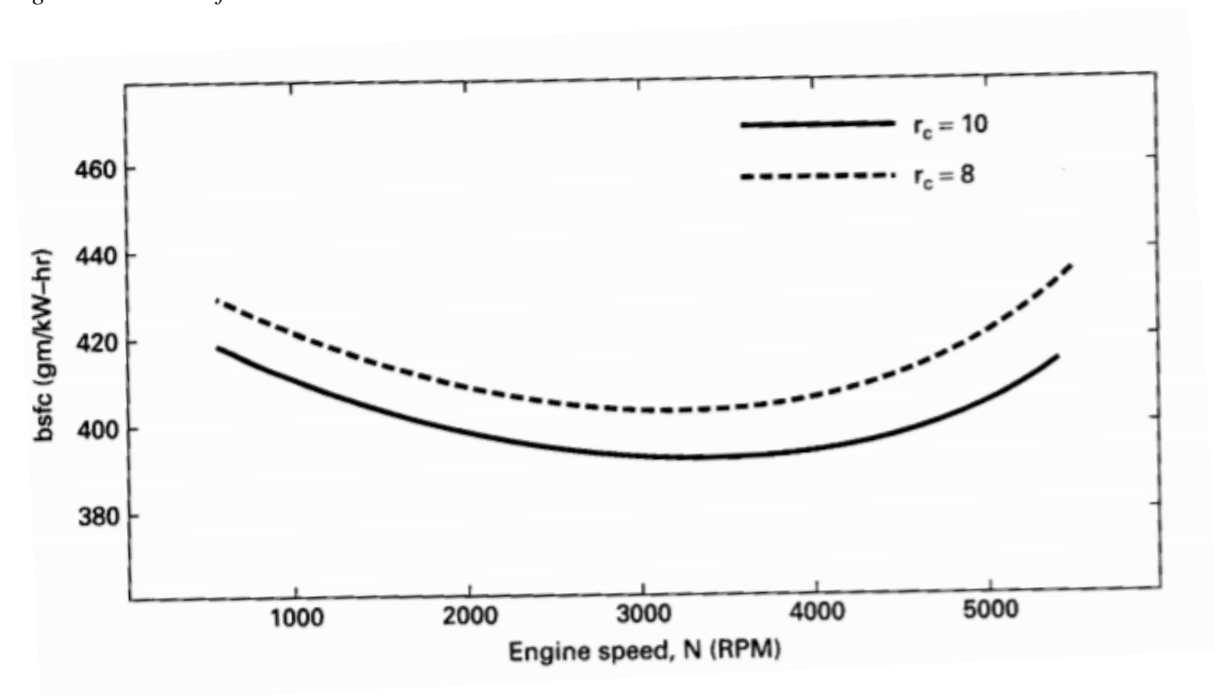
El consumo de combustible disminuye a medida que aumenta la velocidad del motor, esto debido a que el tiempo de pérdida por calor es menor en cada ciclo.

A mayor velocidad del motor, el consumo de combustible aumenta nuevamente debido a altas pérdidas por fricción. Y a medida que aumenta la relación de compresión, el consumo de combustible disminuye debido a una mayor eficiencia térmica. (Pulkrabek, 2007).

El BSFC disminuye a medida que aumenta la velocidad del motor, alcanza un mínimo y luego aumenta a altas temperaturas como se muestra en la figura 9, además el consumo de combustible aumenta a altas velocidades debido a las pérdidas por fricción.

A bajas velocidades del motor, un mayor tiempo por ciclo permite que se retire más calor y aumente el consumo de combustible. (Pulkrabek, 2007)

Figura 9. BSFC en función de la velocidad del motor



Fuente. (Pulkrabek, 2007)

6 MARCO CONCEPTUAL

PARAMETROS DE DESEMPEÑO: son las variables que determinan las características de funcionamiento de un motor. Entre ellos se encuentran los parámetros termodinámicos, parámetros efectivos, entre otros.

MOTOR DE COMBUSTION INTERNA: mecanismo que transforma energía químico-térmica en energía mecánica, por medio de un combustible de trabajo que se somete a la combustión para generar la energía al interior del cilindro.

RELACION DE COMPRESION: valor que indica el número de veces que se comprime un volumen de mezcla desde la admisión (en el PMI) hasta la compresión (en el PMS).

ETAPA DE ADMISION: etapa de un MCI diésel en la cual entra aire a través de la válvula de admisión al cilindro.

ETAPA DE COMPRESION: se cierra la válvula de admisión, y el pistón se desplaza hasta el PMS, comprimiendo el aire contenido en el cilindro y terminando en la cámara de combustión.

ETAPA DE TRABAJO: esta etapa se divide en 3 tiempos; primero se inyecta el combustible en la cámara de combustión donde está el aire comprimido, luego se genera una combustión dadas las condiciones de presión y alta temperatura a las cuales la mezcla reacciona, y por último se genera una expansión fruto de la explosión de la mezcla.

ETAPA DE ESCAPE: en esta etapa se abre la válvula de escape, por donde salen los gases residuales fruto de la explosión de la mezcla.

TRABAJO TEORICO: en términos generales, es el efecto que produce un cuerpo o sistema sobre otro al aplicar una fuerza. Según lo anterior, es la variable esperada luego de calcular el trabajo ideal el cual no tiene en cuenta pérdidas y variables que aporten resistencia al sistema de trabajo.

TRABAJO REAL: de forma simple, es el efecto que produce un cuerpo o sistema sobre otro al aplicar una fuerza. Según lo anterior, es la variable esperada luego de calcular el trabajo teniendo en cuenta pérdidas y variables que aporten resistencia al sistema de trabajo.

CILINDRADA: son los cilindros que posee el bloque de motor, que se caracteriza por tener un volumen unitario (el volumen de un cilindro) y un volumen total (el volumen de un cilindro multiplicado por el número de cilindros).

POTENCIA: es la medida del trabajo desarrollado en un margen de tiempo determinado.

PAR MOTOR: es la fuerza aplicada sobre un punto de un objeto, por la distancia al punto de giro de este mismo.

CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE: medida del volumen consumido de combustible por unidad de tiempo

EMISIONES CONTAMINANTES: son los gases resultantes del proceso de combustión, los cuales tienen una concentración de elementos nocivos para el medio ambiente.

SUSTITUCION: cambio de un combustible por una mezcla compuesta de 2 o más combustibles diferentes.

7 MARCO LEGAL Y NORMATIVO

Se tiene en cuenta los estándares y lineamientos elaborados por un organismo de normalización, dependiendo de la actividad e investigación llevada a cabo. A continuación se citan las normas asignadas para cada actividad de la investigación.

Reglamento de la Universidad Libre (Facultad de Ingeniería)

- Reglamento de investigación Acuerdo No. 06 (octubre 25 de 2006). Se centra en que la investigación constituye un pilar fundamental para el desarrollo del país, en este reglamento se delimitan la investigación científica, técnica y tecnológica para atribuir con el progreso de sectores educativo, social, económicos y políticos.
- Protocolo de presentación de trabajos de grado y proyectos de investigación. Se rige por los documentos emitidos por el comité de unidad académica Acta 009 de septiembre de 2010 respecto a los requisitos necesarios bien sea en semilleros de investigación como los proyectos de grado.

El desarrollo de pruebas de motor y evaluación de parámetros de combustible será regido por las Normas:

- NTC (2037, 1930, 4821, 4901, 4983,)

La NTC 3949 es la norma técnica colombiana creada por el ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación) que establece los requisitos mínimos que deben cumplir las estaciones de regulación de presión, líneas de transporte y líneas primarias de redes de distribución de

gas combustible en cuanto al diseño, construcción, ensayo, operación y mantenimiento se refiere.

Esta norma se aplica específicamente a estaciones de regulación de presión, las cuales eventualmente pueden estar dotadas de sistemas de medición, filtración y odorización. Estos sistemas se pueden presentar simultánea o individualmente. En algunos casos, esta norma establece requisitos para este tipo de sistemas y en otros, se referencian otras normas.

- La norma SAE J1939 de la Sociedad de Ingenieros Automotrices es la práctica recomendada para el uso del autobús vehicular para comunicación y diagnóstico entre los componentes del vehículo. Originado en la industria de automóviles y camiones pesados en los Estados Unidos, ahora se usa ampliamente en otras partes del mundo.
SAE J1939 se utiliza en el área de vehículos comerciales para la comunicación en todo el vehículo, con la capa física definida en ISO 11898. Se usa una capa física diferente entre el tractor y el remolque, especificada en ISO 11992.
- ISO: 6855 (LOS 3 TOMOS), 7116, 17479, 28981, 3833, 416,4164, ISO es la Organización Internacional para la Estandarización, que regula una serie de normas para fabricación, comercio y comunicación, en todas las ramas industriales.
- Se conoce por ISO tanto a la Organización como a las normas establecidas por la misma para estandarizar los procesos de producción y control en empresas y organizaciones internacionales.

- John R. Agudelo de la universidad de Antioquia presenta un artículo acerca del desarrollo de un modelo para el dimensionamiento de mezcladores aire-gas natural para motores teniendo como objetivo no solo servir de guía para fabricantes sino también emplearlo como una herramienta para la selección adecuada de mezcladores en función del tipo de motor.

En conclusión, el modelo mostro que existen soluciones que se salen de lo real entrando en el campo de los complejos, también que las áreas de descarga de combustible más bajas se alcanzan con mezclas pobres y se ven poco afectadas por la cilindrada, por otro lado, el área de la garganta del mezclador no se afectó apreciablemente por la cilindrada del motor y la presión y temperaturas atmosféricas. (Agudelo, John, 2002)

- En el artículo llamado “Evaluación del estado de vehículos a gasolina modificados para funcionar a GLP”, se desarrolló un dispositivo experimental para analizar las variaciones del desempeño de un automóvil a gasolina cuyo sistema primario ha sido modificado para trabajar con GLP.

Dentro de los parámetros evaluados se encuentra la presión en los cilindros, temperaturas, emisión de gases, potencia y torque.

Como resultados encontraron que el uso de GLP como combustible alternativo representa una alternativa ventajosa como lo dice la experiencia europea. También se ha llegado a la conclusión que, a pesar que el GLP es un combustible más económico, al usarse en vehículos diseñados para usar gasolina, podría a largo plazo representar un perjuicio, sobre todo en mantenimiento por reparación correctiva necesaria, esto debido a que algunos factores térmicos son modificados, como se describe a continuación:

Las temperaturas se elevan considerablemente usando GLP, tanto en ralentí como en movimiento.

- A medida que se aumenta la velocidad del vehículo, la temperatura aumenta, esta variación sufre un aumento en su valor a partir de la cuarta velocidad.
- Se pierde potencia y torque al usar GLP.
- El aumento en la temperatura implica necesariamente consecuencias en la durabilidad del motor y sus componentes, al estar el motor diseñado para trabajar

en un intervalo de temperatura y funcionar en otro más alto (con GLP), involucra desgaste más rápido de sus componentes. Se puede afirmar que, entre otras consecuencias, tenemos:

- El aceite se degrada en menos tiempo.
 - Las piezas que trabajan a mayor temperatura, sufren una fatiga mayor y en consecuencia un desgaste más rápido.
 - Todo el sistema de combustión pierde eficiencia al admitir mezcla más caliente.
- La presión se mantiene constante, debido probablemente al corto tiempo de evaluación de este parámetro.
 - El GLP rinde menos que la gasolina, pero el costo es menor, representando una economía que debe ser comparada con aspectos de desgaste del motor. (R. López.)
- Coronado Agreda Bernabé en el año 2017 presenta en su tesis de grado un trabajo de investigación denominado: “ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RENDIMIENTO DE UN MOTOR CON SISTEMA DUAL GASOLINA/GLP MODELO 0.8 L MPI EPSILON A TRAVÉS DEL SOFTWARE STAG 200 EASY HYUNDAI EON”, teniendo como objetivo analizar y calcular el rendimiento de un motor que tiene un sistema dual de gasolina y GLP.
- Se encontró que el software utilizado para su uso utiliza una secuencia de pasos y que el análisis del sistema de alimentación de GLP para el motor Hyundai de 0.8L dual es de bajo costo, confiable, económico y bajas emisiones contaminantes. (Coronado, B, 2017)

- En el año 2014, Juan Miguel Mantilla y colaboradores presentan un artículo acerca del desempeño y emisiones de un motor de combustión interna con combustible diésel-gas natural, y encontraron que el motor de combustión interna encendido por compresión operando en modo dual tiene un desempeño similar al obtenido cuando trabaja con 100% diésel, en términos de carga y velocidad de giro.

La eficiencia térmica, figura 11, muestra un comportamiento lógico respecto a la equivalencia en donde para mezclas de Diésel y GNV pobres se encuentran valores altos. Entre bajas y medias cargas se puede observar una eficiencia térmica mayor para el Diésel 100%, pero para altas cargas después de 250 kPa de bmep, la eficiencia tiende a ser mayor para los modos duales, esto principalmente ya que manejan relaciones de equivalencia a la entrada más pobres que en el modo Diésel. Además, el valor del BSFC también confirma esa tendencia, fig. 12.

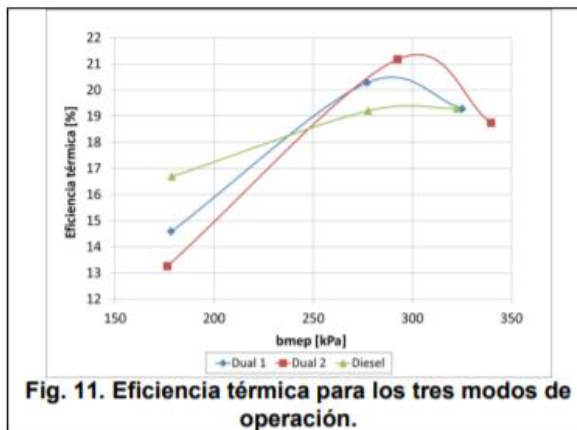


Fig. 11. Eficiencia térmica para los tres modos de operación.

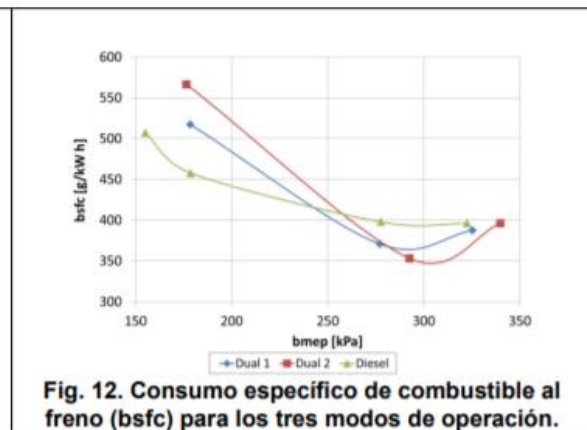


Fig. 12. Consumo específico de combustible al freno (bsfc) para los tres modos de operación.

Fuente. (Mantilla, Juan, 2010)

Un parámetro a tener en cuenta es la sustitución de combustible Diésel por GNV. Esta variable tiene una tendencia clara para los dos modos de operación: A mayores potencias, el porcentaje de sustitución es mayor, llegando hasta un máximo de 68%, con lo cual se está logrando una condición de operación favorable, es decir, altas sustituciones de Diésel por GNV.

Se encontró que la curva de presión en la cámara de combustión para el Diésel al 100% siempre es mayor que los otros modos de operación Dual. Esto se debe al retardo de la ignición del GNV en la cámara de combustión, ya que la temperatura de ignición del GNV es mayor a la del Diésel. Una solución a este problema podría ser modificar el tiempo de inyección del Diésel (adelantarlo), así se lograría ampliar el tiempo efectivo de la mezcla Diésel-GNV para poder lograr el proceso de combustión.

Esto también contribuye a un desempeño desfavorable en la operación del motor bajo los esquemas Dual Diésel-GNV, en lo que respecta a las emisiones en bajas cargas. En promedio, el porcentaje de sustitución de combustible Diésel por GNV alcanzado durante las pruebas realizadas fue de 55%, registrando un mínimo cercano a 35% y un máximo de 75%. (Mantilla, Juan, 2010)

- La Universidad Nacional presenta un artículo sobre la Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kW en modo diésel-gas licuado de petróleo donde se tiene como objetivo Determinar los parámetros de desempeño de un motor generados por una sustitución diésel-GLP.

Encontraron que la eficiencia energética total del sistema en el punto de máxima carga fue igual a 39,9% en modo diésel y 35,1% con una relación de sustitución del 28,5 % en modo dual. La adición de GLP resultó en una disminución del índice de emisiones de CO₂ de 0,76 a 0,71 kg/kWh-1.

En cuanto a los parámetros mecánicos y entrega energética se encontró que la comparación de las dos eficiencias máximas alcanzadas (funcionando con Diésel y

funcionando con sustitución Diésel-GLP respectivamente) tan solo tenían 5% de diferencia, y esto teniendo en cuenta que el diseño de este sistema de generación fue hecho para usarse con Diésel, lo cual indica, que con un diseño pensado para esta sustitución presenta una gran oportunidad de aprovechamiento energético.

La emisión de CO₂ por parte de la sustitución Diésel-GLP fueron notablemente menores que las emisiones usando Diésel, que se traduce en 183,04 ton CO₂ año que dejan de emitirse por la operación del equipo. (Forero, Carlos, 2014)

-Bedoya, C y colaboradores investigaron el “Efecto del Grado de Carga y la Cantidad del Combustible Piloto en el Comportamiento Mecánico Ambiental de un Motor Dual Diésel-Biogás Para Generación de Electricidad”, donde tenían como objetivo evaluar el comportamiento y respuesta de los parámetros mecánico-ambientales con la variación de la carga y la cantidad de combustible en un motor dual para generación de electricidad.

Encontraron que, debido a la reducción en la eficiencia efectiva al reducir la cantidad de combustible piloto en modo dual, al igual que aumentos considerables en las emisiones de CH₄ y monóxido de carbono (CO), la opacidad del humo no varía significativamente en modo dual, pero muestra una reducción drástica al compararla con las medidas para el motor en modo diésel. Por lo anterior se puede concluir que la sustitución Diésel-Biogás es una muy buena alternativa para reemplazar el actual uso del Diesel y así dar una alternativa razonable para suplir la demanda actual de combustibles. (Bedoya, C, 2007)

- Marcela, O y compañía dan a conocer el artículo llamado “Aplicación del Modelo Casi Ideal de Demanda al Mercado de Combustibles en el Sector de Transporte en Colombia”, aquí buscan aclarar y determinar el comportamiento de la demanda de los combustibles principales (Gasolina, Diésel y GNV) en el sector transporte a nivel nacional.

Determinaron que, con base en la estimación del modelo, se encontró que la Gasolina y el Diésel se comportan como bienes normales, mientras que el GNV resulta ser un bien inferior según la elasticidad gasto de la demanda. En cuanto a la elasticidad precio de la demanda, la Gasolina y el Diésel resultan ser bienes inelásticos, mientras que el GNV se comporta como un bien elástico ante variaciones en el precio. Finalmente, se encuentran comportamientos interesantes entre los diferentes combustibles según las elasticidades cruzadas de la demanda, permitiendo entender las relaciones de sustitución y/o complementariedad para cada caso. En particular, se tiene que solo el Diésel y el GNV se comportan como bienes sustitutos, mientras que para el resto de relaciones (Gasolina-Diésel y

Gasolina-GNV) se observa un comportamiento de complementariedad. (Orrego, M., Castaño, J., 2015)

- En Bogotá, la Universidad de los Andes presentó una estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad e identificación en variables pertinentes, en la cual se determinó que los buses representan la categoría vehicular más importante, en términos de emisiones de contaminantes, a pesar de representar menos del 5% del total de vehículos en la ciudad. Los buses generan 50% de las emisiones de PM10, cerca del 30% de las emisiones de CO y 40% de las emisiones de NOx. Se determinó que el mejoramiento de la calidad de los combustibles diésel es la mejor estrategia para la reducción de las emisiones de PM10 en Bogotá. (Giraldo, L., Behrentz, E., s.f)

9 DISEÑO METODOLOGICO

9.1 Clase de investigación

El presente proyecto de investigación es de tipo cuantitativo experimental ya que se evalúan datos de tipo numérico para la comparación de parámetros de desempeño del motor y se manipulan variables de entrada para evaluar los cambios en las variables de salida.

9.2 Metodología

Como primera medida se realiza una prueba piloto con el combustible base Diésel con las diferentes variaciones de cargas del banco de resistencias (100%, 80%, 60%, 40%, 20%), seguido de las pruebas con las variaciones de la sustitución Diésel – GNV (95%D – 5% GNV, 90%D – 10% GNV, 85% D – 15% GNV, 80% D – 20% GNV) a las mismas variaciones de carga.

9.2.1 100% Diésel – 0% Gas natural

En primera instancia se harán pruebas con el combustible base (Diésel) que será la guía para poder comparar los parámetros de desempeño del motor con la sustitución entre Diésel y Gas Natural teniendo en cuenta los siguientes pasos:

- Registrar las condiciones ambientales (temperatura ambiente y humedad relativa del ambiente)
- Poner en marcha el motor utilizando Diésel como combustible de referencia.

Figura 10. Motor mono cilíndrico F210 de 4 tiempos



Fuente. Autor del proyecto.

- Aplicar la primera condición que es Diésel con 100% de carga y posteriormente medir las siguientes condiciones: Consumo específico de combustible, torque y potencia, voltaje y corriente de consumo del generador y consumo de aire del motor.

Figura 11. Combustible base Diésel



Fuente. Autor del proyecto.

- Realizar la misma medición anterior con Diésel y 80% de carga y medir las anteriores condiciones que son: Consumo específico de combustible, torque y potencia, voltaje y corriente de consumo del generador y consumo de aire del motor.
- Realizar la misma medición anterior con Diésel y 60% de carga y medir las anteriores condiciones que son: Consumo específico de combustible, torque y potencia, voltaje y corriente de consumo del generador y consumo de aire del motor.
- Realizar la misma medición anterior con Diésel y 40% de carga y medir las anteriores condiciones que son: Consumo específico de combustible, torque y potencia, voltaje y corriente de consumo del generador y consumo de aire del motor.
- Realizar la misma medición anterior con Diésel y 20% de carga y medir las anteriores condiciones que son: Consumo específico de combustible, torque y potencia, voltaje y corriente de consumo del generador y consumo de aire del motor.
- En cada una de las pruebas con las diferentes cargas para el Diésel, se debe cerrar la válvula de admisión de combustible y permitir que el equipo consuma el combustible que quede en la línea hasta que se apague.

9.2.2 SUSTITUCION DIESEL – GAS NATURAL

- Registrar las condiciones ambientales (temperatura ambiente y humedad relativa del ambiente)
- Poner en marcha el motor utilizando la sustitución entre Diésel y Gas Natural como combustible.
- Aplicar la primera condición que es 95% Diésel y 5% GNV con cada variación de la carga (100%, 80%, 60%, 40% y 20%) y posteriormente medir las siguientes condiciones: Consumo específico de combustible, torque y potencia, voltaje y corriente de consumo del generador y consumo de aire del motor.
- Realizar la misma medición anterior con 90% Diésel y 10% GNV con cada variación de la carga (100%, 80%, 60%, 40% y 20%) y medir las anteriores condiciones que son: Consumo específico de combustible, torque y potencia, voltaje y corriente de consumo del generador y consumo de aire del motor.
- Realizar la misma medición anterior con 85% Diésel y 15% GNV con cada variación de la carga (100%, 80%, 60%, 40% y 20%) y medir las anteriores condiciones que son: Consumo específico de combustible, torque y potencia, voltaje y corriente de consumo del generador y consumo de aire del motor.
- Realizar la misma medición anterior con 80% Diésel y 20% GNV con cada variación de la carga (100%, 80%, 60%, 40% y 20%) y medir las anteriores

condiciones que son: Consumo específico de combustible, torque y potencia, voltaje y corriente de consumo del generador y consumo de aire del motor.

- Evaluar y comparar los parámetros de desempeño obtenidos de las pruebas con la sustitución entre Diésel y Gas Natural contra los datos obtenidos con el Diésel puro.

9.3 Diseño de experimentos

A través del experimento se quiere comparar los parámetros de desempeño de un motor de combustión interna de ciclo diésel trabajando con una sustitución de diésel y gas natural con el fin de generar una nueva opción de generación de energía, que posiblemente tenga iguales o mejores características de rendimiento que la actual base de Diésel usada.

Como primera medida se realiza un experimento para poder comparar los parámetros de desempeño del diésel únicamente, con las diferentes variaciones de la carga del freno y sus respectivas respuestas (Torque, Potencia y Consumo Específico).

De tal manera las variables que se hacen relevantes en el análisis del experimento son la carga del freno y la sustitución de diésel y gas natural, y los parámetros de desempeño como variables de respuesta son el torque, la potencia y el consumo específico del motor.

9.3.1 Prueba piloto y superficies de respuesta

En la tabla 4 se plantea la variación de la sustitución de diésel y gas natural desde 95% hasta el 80% para el diésel y del 5% hasta el 20% para el caso del gas natural.

Tabla 4. Combinación de las variables de entrada.

SUSTITUCION DIESEL-GNV		Carga del freno
95%	5%	100%
90%	10%	80%
85%	15%	60%
80%	20%	40%

Fuente. Autor del proyecto.

La metodología que se usa para el experimento es por superficie de respuesta con un diseño de 2^k con 4 niveles la cual busca entender o hacer un mapeo de una región de superficie de respuesta. En el diseño experimental se modela como los cambios en las variables de entrada afectan las variables de respuesta o de interés, también para hallar los niveles de las variables que logran optimizar la respuesta bajo ciertas condiciones operativas.

En la tabla 5 y en la tabla 6 se organizan los experimentos por niveles de carga y de variables de respuesta, con variaciones de 20% en 20% a partir de la carga máxima y hasta la carga mínima de 100% y 20% respectivamente.

Tabla 5. Prueba piloto combustible base Diésel

Combustible Diésel	Carga al freno	Respuesta
DIESEL	100%	Torque
DIESEL	80%	Torque
DIESEL	60%	Torque
DIESEL	40%	Torque
DIESEL	20%	Torque
DIESEL	100%	Potencia
DIESEL	80%	Potencia
DIESEL	60%	Potencia
DIESEL	40%	Potencia
DIESEL	20%	Potencia
DIESEL	100%	Consumo específico
DIESEL	80%	Consumo específico
DIESEL	60%	Consumo específico
DIESEL	40%	Consumo específico
DIESEL	20%	Consumo específico

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 6. Superficies de respuesta para las variables de entrada con sustitución Diésel-GNV.

Variable 1 (sustitución Diésel-GNV)	Variable 2 (carga del freno)
95% D – 5% GVN	100%
95% D – 5% GVN	80%
95% D – 5% GVN	60%
95% D – 5% GVN	40%
95% D – 5% GVN	20%
90% D – 10% GVN	100%
90% D – 10% GVN	80%
90% D – 10% GVN	60%
90% D – 10% GVN	40%
90% D – 10% GVN	20%
85% D – 15% GVN	100%
85% D – 15% GVN	80%
85% D – 15% GVN	60%
85% D – 15% GVN	40%
85% D – 15% GVN	20%
80% D – 20% GVN	100%
80% D – 20% GVN	80%
80% D – 20% GVN	60%
80% D – 20% GVN	40%
80% D – 20% GVN	20%

Fuente. Autor del proyecto.

De tal forma se plantea como primera medida una prueba piloto con el combustible base Diésel y 16 experimentos con superficie de respuesta con la sustitución como combustible.

Para los resultados de las superficies de respuesta se han tomado los datos únicamente hasta el 40% ya que las pruebas al 20% son semejantes a los datos del motor a ralentí.

10 RESULTADOS Y ANALISIS

10.1 Datos obtenidos de las pruebas con las variaciones de carga y con combustible base Diésel

En las tablas 7 hasta la 11 se registran los datos obtenidos de las pruebas a partir de la variación de las cargas; el motor se mantendrá constante a 3600 RPM.

Tabla 7. Prueba con Diésel carga 100%

CARGA	SECUENC	TEMP	CONSUMO				
%	N°	°C	ml	RPM	INTENSIDAD	VOLTAJE	
					I1	V1	Hz 2
100%	inicial	885	495	3600	14,10	86,60	60,80
100%	1	885	40	3600	14,10	86,60	60,80
100%	2	885	48	3600	14,10	86,60	60,80
100%	3	885	47	3600	14,10	86,60	60,80
100%	4	885	40	3600	14,10	86,60	60,80
100%	5	885	45	3600	14,10	86,60	60,80

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 8. Prueba con Diésel carga 80%

CARGA	SECUENC	TEMP	CONSUMO	POTENCIA			
%	N°	°C	ml	RPM	INTENSIDAD	VOLTAJE	
					I1	V1	Hz 2
80%	inicial	860	460	3600	12,30	94,00	60,00
80%	1	860	43	3600	12,30	94,00	60,00
80%	2	860	47	3600	12,30	94,00	60,00
80%	3	860	38	3600	12,30	94,00	60,00
80%	4	860	42	3600	12,30	94,00	60,00
80%	5	860	40	3600	12,30	94,00	60,00

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 9. Prueba con Diésel carga 60%

CARGA	SECUENC	TEMP	CONSUMO	POTENCIA			
%	N°	°C	ml	RPM	INTENSIDAD	VOLTAJE	
					I1	V1	Hz 2
60%	inicial	780	462	3600	10,2	104,0	60,00
60%	1	780	37	3600	10,2	104,0	60,00
60%	2	780	45	3600	10,2	104,0	60,00
60%	3	780	48	3600	10,2	104,0	60,00
60%	4	780	30	3600	10,2	104,0	60,00
60%	5	780	42	3600	10,2	104,0	60,00

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 10. Prueba con Diésel carga 40%

CARGA	SECUENC	TEMP	CONSUMO	POTENCIA			
%	N°	°C	ml	RPM	INTENSIDAD	VOLTAJE	
					I1	V1	Hz 2
40%	inicial	723	477	3600	7,1	115	60,00
40%	1	723	32	3600	7,1	115	60,00
40%	2	723	33	3600	7,1	115	60,00
40%	3	723	35	3600	7,1	115	60,00
40%	4	723	32	3600	7,1	115	60,00
40%	5	723	33	3600	7,1	115	60,00

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 11 Prueba con Diésel carga 20%

CARGA	SECUENC	TEMP	CONSUMO	POTENCIA			
%	N°	°C	ml	RPM	INTENSIDAD	VOLTAJE	
					I1	V1	Hz 2
20%	inicial	280	222	3600	3,6	115,0	60,00
20%	1	280	20	3600	3,6	115,0	60,00
20%	2	280	22	3600	3,6	115,0	60,00
20%	3	280	23	3600	3,6	115,0	60,00
20%	4	280	20	3600	3,6	115,0	60,00
20%	5	280	25	3600	3,6	115,0	60,00

Fuente. Autor del proyecto.

A partir de los datos obtenidos en las tablas anteriores se realizan los cálculos pertinentes para los parámetros de desempeño (Torque, Potencia y consumo específico) y así poder graficar las curvas características de combustible.

10.2 Cálculos con únicamente Diésel a partir de los datos de la carga al 100%

Promediando los valores del consumo, la intensidad y el voltaje de las tablas 7 hasta la 11 se procede a realizar los siguientes cálculos:

$$\text{Volúmen} = 44 \text{ ml} / 1e^6 [m^3]$$

$$\text{Volúmen} = 0,000044 m^3$$

Es necesario convertir los mililitros [ml] a metros cúbicos [m^3] para trabajar con unidades consistentes.

Seguido se halla el valor de la Potencia y el Voltaje:

$$P = \frac{I * V * 0,8}{1000} [kW]$$

Ecuación 10. Potencia

Siendo I la intensidad, V el voltaje y 0,8 un factor de corrección; entonces:

$$P = \frac{(14,1) * (86) * 0,8}{1000} [kW]$$

$$P = 0,9768 [kW]$$

Teniendo ya la potencia se calcula el torque con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{P * 1000}{2\pi * f} [N * m]$$

Ecuación 11. Torque

Donde P es la potencia y f la frecuencia en Hz, entonces el torque para la carga de 100% sería:

$$T = \frac{(0,9768) * 1000}{2\pi * (60)} [N * m]$$

$$T = 2,59 [N * m]$$

Ahora para calcular el consumo específico de combustible es necesario hallar primero el caudal y el flujo de masa de combustible, para eso usamos las siguientes ecuaciones:

$$Q = \frac{Volumen}{t} [\frac{m^3}{s}]$$

Ecuación 12. Caudal de combustible

Siendo t el tiempo

$$Q = \frac{0,000044}{60s}$$

$$Q = 7,33e^{-7} [\frac{m^3}{s}]$$

Para el flujo de masa es necesario dividir el caudal de combustible sobre la densidad del combustible; que para el caso del Diésel es de $850 \frac{kg}{m^3}$

$$\dot{m}_f = \frac{Q}{\rho} [\frac{kg}{s}]$$

Ecuación 13. Flujo de masa de combustible

Donde Q es el caudal de combustible y ρ la densidad, entonces:

$$\dot{m}_f = \frac{7,33e^{-7}}{850}$$

$$\dot{m}_f = 6,2e^{-4} [\frac{kg}{s}]$$

Teniendo el caudal y el flujo de masa se calcula el consumo específico de combustible al freno:

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P} [\frac{kg}{kW * h}]$$

Ecuación 14. Consumo específico de combustible al freno

$$BSFC = \frac{6,2e^{-4}}{0,9768} \left[\frac{kg}{kW * h} \right]$$

$$BSFC = 2,297 \left[\frac{kg}{kW * h} \right]$$

10.3 Resultados de la prueba con únicamente Diésel

Los anteriores cálculos se repiten para cada una de las diferentes cargas (100%, 80%, 60%, 40% y 20%), asimismo como en las variaciones de la sustitución (95% D – 5% GNV, 90% D – 10% GNV, 85% D – 15% GNV y 80% D – 20% GNV).

En la tabla 12 se encuentran registrados los cálculos para la prueba realizada con únicamente Diésel como combustible base para la posterior comparación seguido de las curvas características.

Tabla 12. Cálculos para la prueba realizada con combustible base Diésel 100%

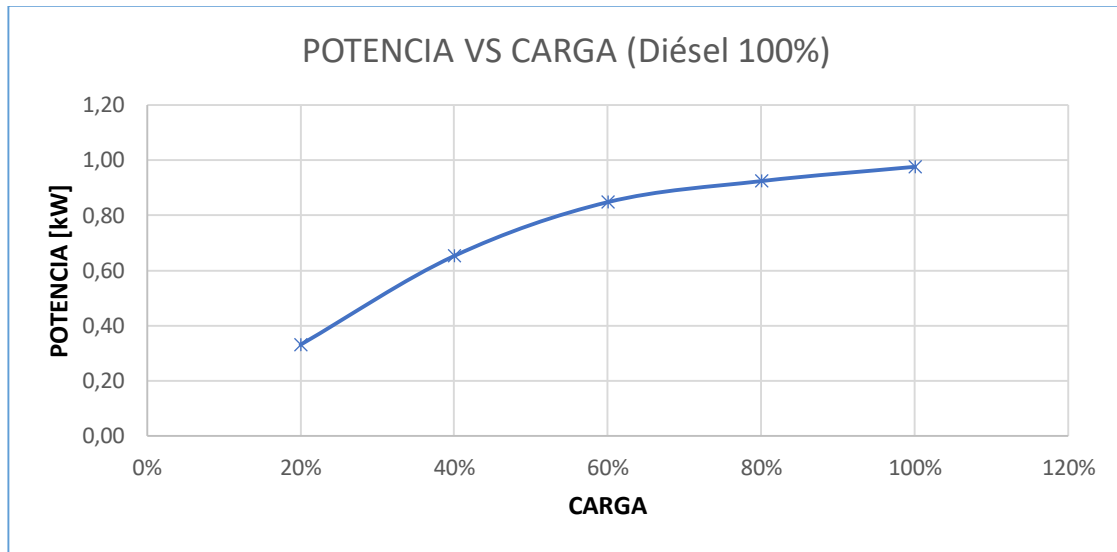
POTENCIA	Volumen	t	Caudal	Densidad	Flujo de masa	BSFC	Torque	CARGA
kW	m3	s	m ³ /s	kg/m ³	kg/s	Kg/KW*h	Nm	
0,98	4,E-05	60	7,3,E-07	850	6,E-04	2,297	2,59	100%
0,92	4,E-05	60	7,0,E-07	850	6,E-04	2,315	2,45	80%
0,85	4,E-05	60	6,7,E-07	850	6,E-04	2,427	2,25	60%
0,65	3,E-05	60	5,5,E-07	850	5,E-04	2,576	1,73	40%
0,33	2,E-05	60	3,7,E-07	850	3,E-04	3,387	0,88	20%

Fuente. Autor del proyecto.

Para entender o visualizar mejor los datos recogidos, se han graficado los valores de la tabla 12 (Diesel 100%).

Las figuras 12, 13 y 14, muestran el comportamiento de la Potencia, el Torque y el Consumo específico de las pruebas realizadas con Diésel al 100%.

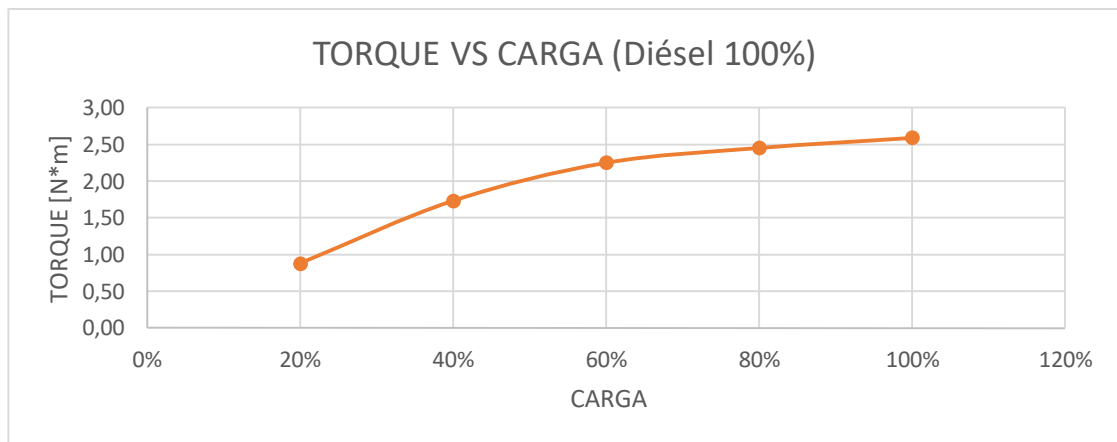
Figura 12. Potencia Vs Carga (Diésel 100%)



Fuente. Autor del proyecto.

El valor máximo de la Potencia al 100% de la carga fue de 0,98 kW y el menor al 20% de la carga fue de 0,33 kW.

Figura 13. Torque Vs Carga (Diésel 100%)

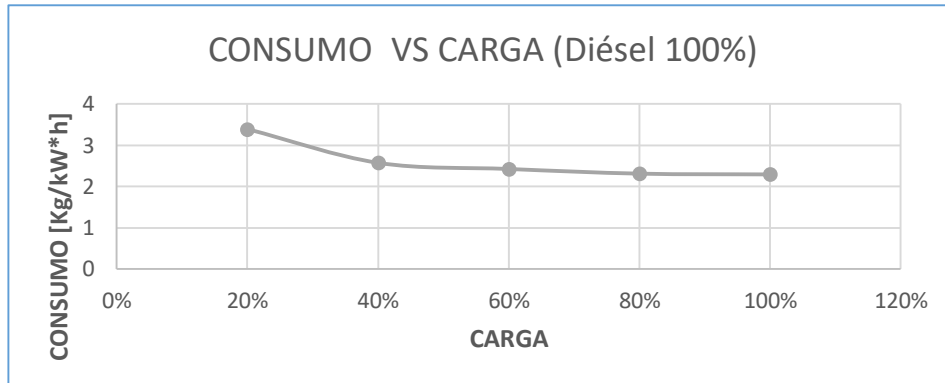


Fuente. Autor del proyecto.

El valor maximo del Torque al 100% de la carga fue de 2,59 N-m y el minimo al 20% fue de 0,88 N-m

En la figura 12 el valor minimo de consumo fue de $2,3 \frac{KJ}{kW*h}$ y el máximo fue de $3,39 \frac{KJ}{kW*h}$.

Figura 14. Consumo Vs Carga (Diésel 100%)



Fuente. Autor del proyecto.

Se puede ver que la tendencia tanto de la Potencia como del Torque es creciente a medida que aumenta la carga, caso contrario al Consumo específico de combustible donde se ve que su comportamiento tiende a disminuir a medida que aumenta la carga.

Esto se debe a que las RPM se encuentran constantes a 3600, las figuras 8 y 9 en el apartado 5.4.5 muestran como es el comportamiento de estos parámetros de desempeño en motores recíprocos, de las cuales se puede decir que los resultados concuerdan con la teoría.

De igual forma hay que tener en cuenta que en el cálculo del BSFC (ecuación 14), si la Potencia aumenta el BSFC va a tender a disminuir.

10.4 Resultados del GNV a partir de los datos de la carga al 100%

De la misma manera que con el Diésel se realiza la prueba únicamente con el GNV como combustible base y con los datos se calculan los parámetros de desempeño como se muestra en la tabla 13 y 14:

Tabla 13. Datos prueba GNV carga 100%

CARGA	SECUENC	TEMP	CONSUMO	POTENCIA		
%	N°	°C	Kg	RPM	INTENSIDAD	VOLTAJE
					I1	V1
100%	1	812	0,00	3600	13,20	81,00
100%	2	885	0,18	3600	13,20	81,00
100%	3	822	0,18	3600	13,20	81,00
100%	4	890	0,20	3600	13,10	80,90
PROMEDIO		840,17	0,18	3600,00	13,15	80,95

Fuente. Autor del proyecto.

Teniendo en cuenta que el consumo para el GNV se tomó en valores de masa (Kg), hay que hallar el volumen por medio de la ecuación de gases ideales:

$$PV = RT$$

Ecuación 15. Ecuación de gases ideales

Donde P es la presión absoluta

v es el Volumen específico

R es la constante universal de gases ideales

T es la temperatura absoluta

Se sabe que la presión absoluta de Bogotá es de 74kPa, que la temperatura en la prueba fue de 21.6°C (294,6 K) y que el GNV está compuesto en un 90% de Metano, entonces tomando la R del metano que es $0,5182 \left[\frac{KJ}{Kg \cdot K} \right]$ y despejando el volumen de la ecuación 15:

$$v = \frac{RT}{P} m^3$$

$$v = \frac{(0,5182)(294,6)}{74} m^3$$

$$v = 2,0629 \frac{m^3}{kg}$$

Ahora hay que calcular la densidad con la ecuación 16:

$$v = \frac{1}{\rho} \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$$

Ecuación 16. Volumen específico

$$\rho = \frac{1}{2,0629} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\rho = 0,4847 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Con esta densidad calculamos el volumen del consumo de combustible para poder continuar con los cálculos de los parámetros de desempeño como se realizó en el apartado **10.2**:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Ecuación 17. Ecuación de densidad

Siendo m la masa y V el volumen, despejando de la ecuación 17 y tomando el promedio del valor del consumo de la tabla 13, se halla el valor del volumen:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{0,18 \text{ kg}}{0,4847 \frac{kg}{m^3}}$$

$$V = 0,37133 m^3$$

En la tabla 14 se encuentran consignado los valores de los resultados para los parámetros de desempeño de la prueba realizada únicamente con GNV.

Tabla 14. Cálculos para la prueba realizada con combustible base GNV

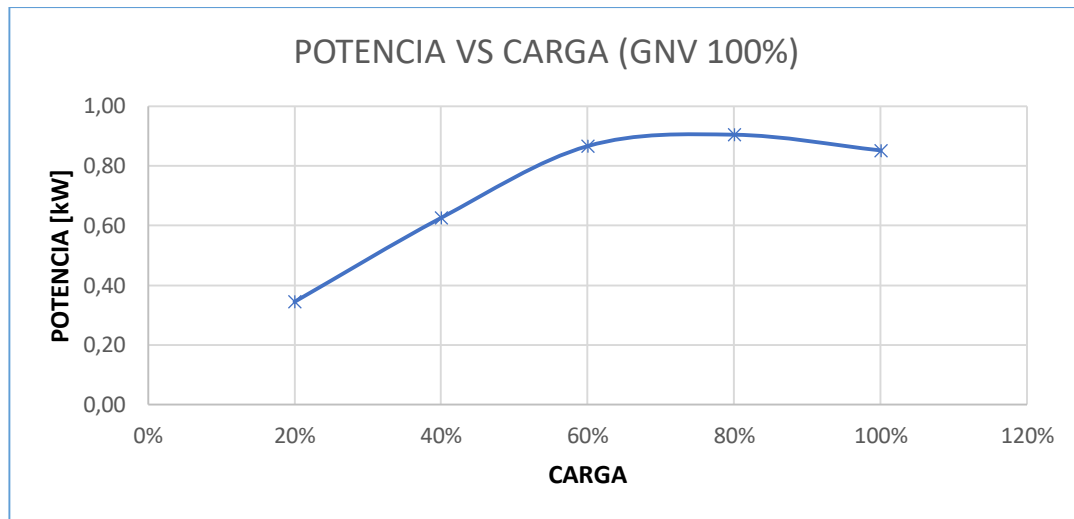
POTENCIA	volumen	tiempo	caudal combustible	densidad	flujo de masa de fuel	BSFC	torque	CARGA
kW	m3	s	m^3/s	kg/m^3	kg/s	Kg/KW*h	Nm	
0,85	4,E-01	60	6,2,E-03	0,743	5,E-03	19,4392	2,26	100%
0,90	4,E-01	60	6,3,E-03	0,743	5,E-03	18,7169	2,40	80%
0,87	3,E-01	60	5,8,E-03	0,743	4,E-03	17,8409	2,30	60%
0,63	2,E-01	60	4,0,E-03	0,743	3,E-03	17,0438	1,66	40%
0,35	2,E-01	60	3,6,E-03	0,743	3,E-03	27,7128	0,92	20%

Fuente. Autor del proyecto.

De igual forma que se hizo con el Diésel, se grafican los datos para entenderlos de forma mas clara.

A continuación, se muestran las gráficas para la Potencia, el Torque y el Consumo especifico de combustible para la prueba realizada únicamente con GNV a las diferentes cargas:

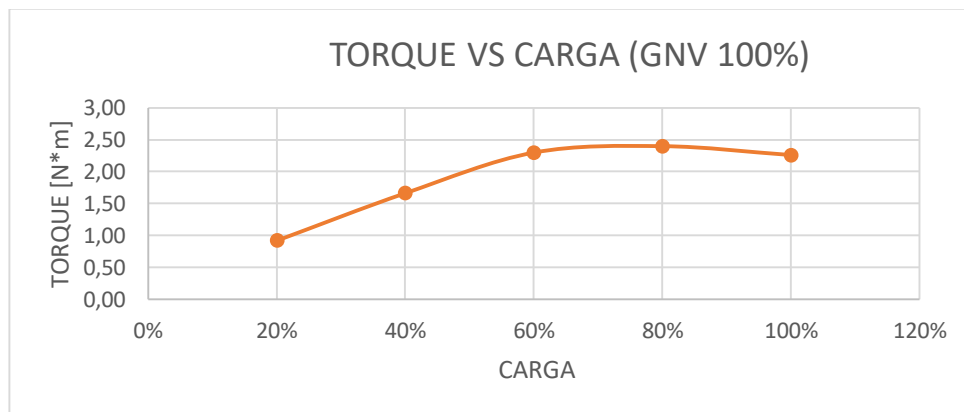
Figura 15. Potencia Vs Carga (GNV 100%)



Fuente. Autor del proyecto.

La Potencia maxima para el GNV fue de 0,90 kW a la carga del 80% y la minima de 0,35 kW al 20%

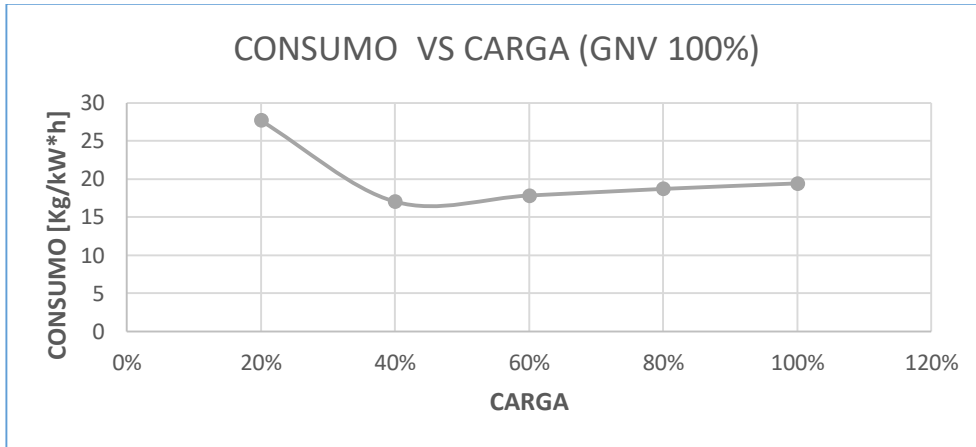
Figura 16. Torque Vs Carga (GNV 100%)



Fuente. Autor del proyecto.

El Torque maximo para el GNV fue de 2,4 N-m a la carga del 80% y la minima de 0,92 N-m al 20%.

Figura 17. Consumo Vs Carga (GNV 100%)



Fuente. Autor del proyecto.

El valor máximo del BSFC para el GNV fue de $27,6 \frac{KJ}{kW \cdot h}$ a la carga del 20% y el mínimo fue de $17,04 \frac{KJ}{kW \cdot h}$ al 40% de la carga

De igual manera como con el Diésel, el comportamiento de los parámetros de desempeño del GNV, como la Potencia y el Torque, tiende a crecer a medida que aumenta la carga, como se había mencionado en la teoría del apartado 5.4.5, el comportamiento es similar tanto del torque como la potencia ya que la prueba se realizó a 3600 RPM.

Además, el BSFC disminuye a medida que aumenta la Potencia y la carga.

10.5 Resultados de la sustitución Diésel – GNV

El proceso para calcular los parámetros de desempeño de la sustitución entre el Diésel y el GNV es igual al anterior.

Aquí se variaron los porcentajes de la mezcla y las cargas para analizar el comportamiento de la mezcla y poder realizar una comparación

En la tabla 15 se encuentran consignados los resultados de la prueba realizada con la sustitución con un 90% de combustible Diésel y un 5% de GNV.

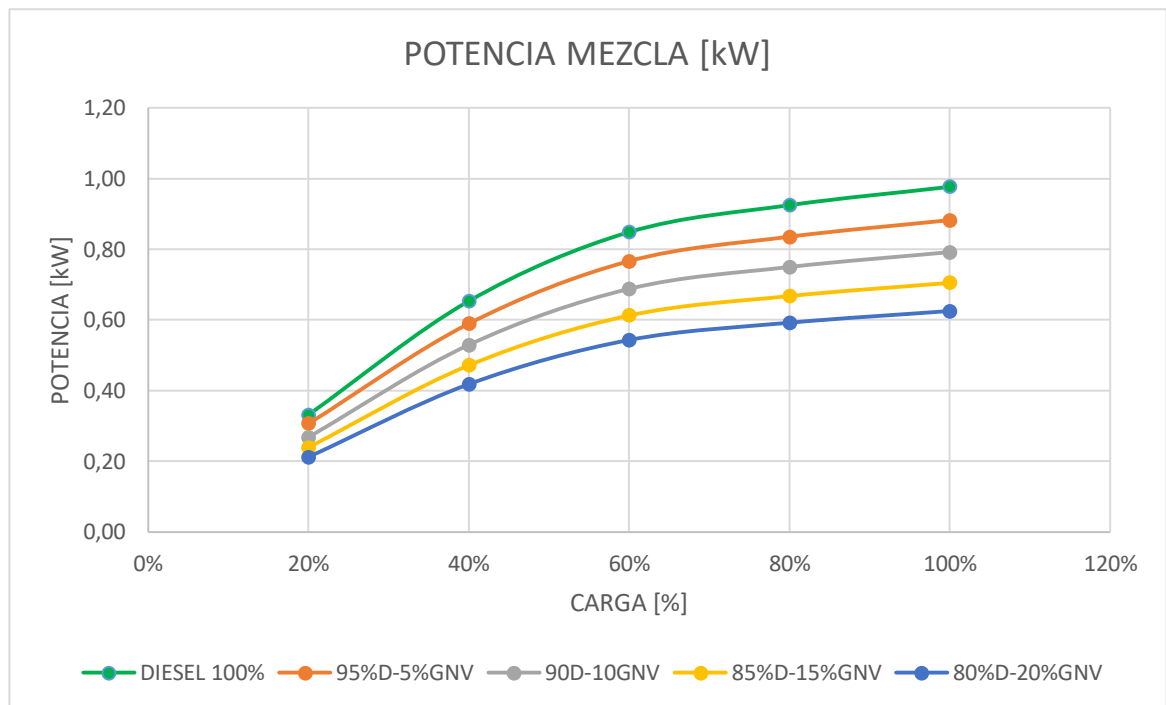
Tabla 15. Resultados de la sustitución con 95% Diésel y 5% GNV.

POTENCIA	VOL	t	Caudal	Densidad	flujo de masa de fuel	BSFC	TORQUE	CARGA
kW	m3	s	m ³ /s	kg/m ³	kg/s	Kg/KW*h	Nm	
0,88	2,E-02	60	3,0,E-04	807,53715	2,E-01	1003,32	2,34	100%
0,83	2,E-02	60	3,1,E-04	807,53715	3,E-01	1082,99	2,21	80%
0,77	2,E-02	60	2,8,E-04	807,53715	2,E-01	1077,86	2,03	60%
0,59	1,E-02	60	2,0,E-04	807,53715	2,E-01	967,32	1,56	40%
0,30	1,E-02	60	1,8,E-04	807,53715	1,E-01	1709,24	0,79	20%

Fuente. Autor del proyecto.

La figura 18 muestra las curvas características de Potencia con la sustitución de Diesel – GNV a diferentes cargas y porcentajes de la mezcla.

Figura 18. Curvas características de Potencia para la sustitución de Diésel - GNV

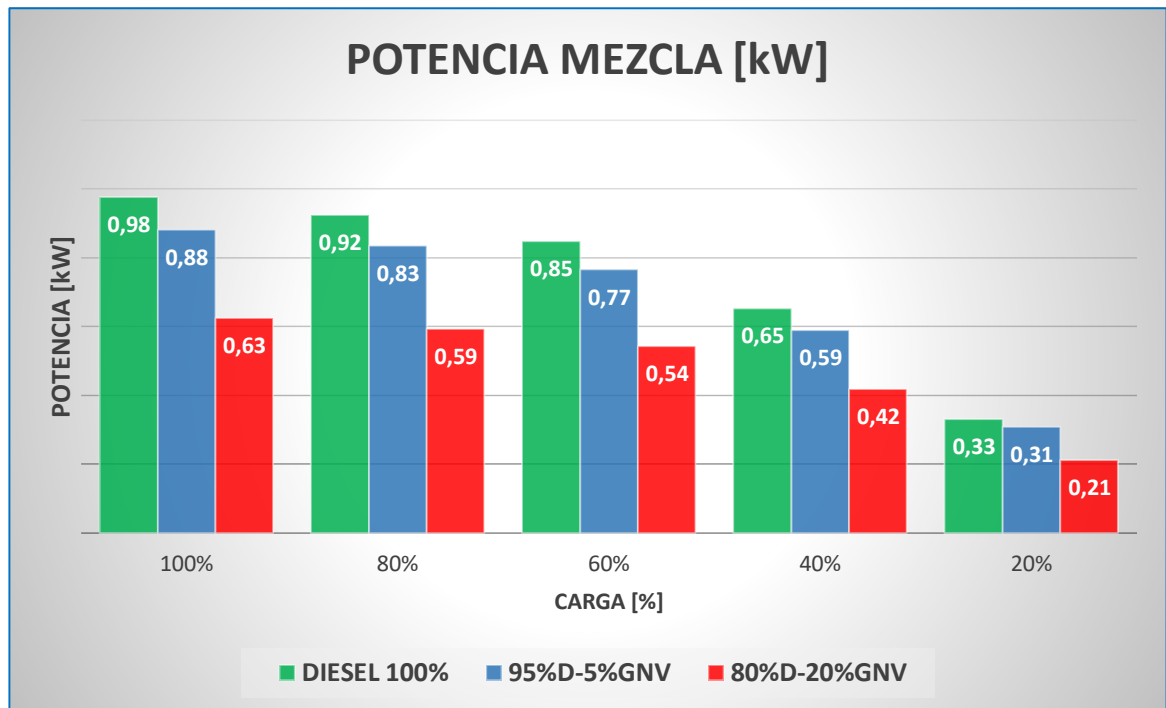


Fuente. Autor del proyecto.

Es evidente que la prueba con únicamente Diésel fue la que obtuvo la potencia más alta seguido de la mezcla con el 95% de Diésel y el 5% de GNV y siendo la mezcla de 80% Diésel y 20% GNV la que obtuvo la potencia más baja en todas las variaciones de la carga.

Para entender mejor los resultados se muestra la figura 19 donde se han graficado los valores más altos de Potencia que corresponden a la prueba con únicamente Diésel y los más altos y bajos de la sustitución:

Figura 19. Resultados de las pruebas de Potencia



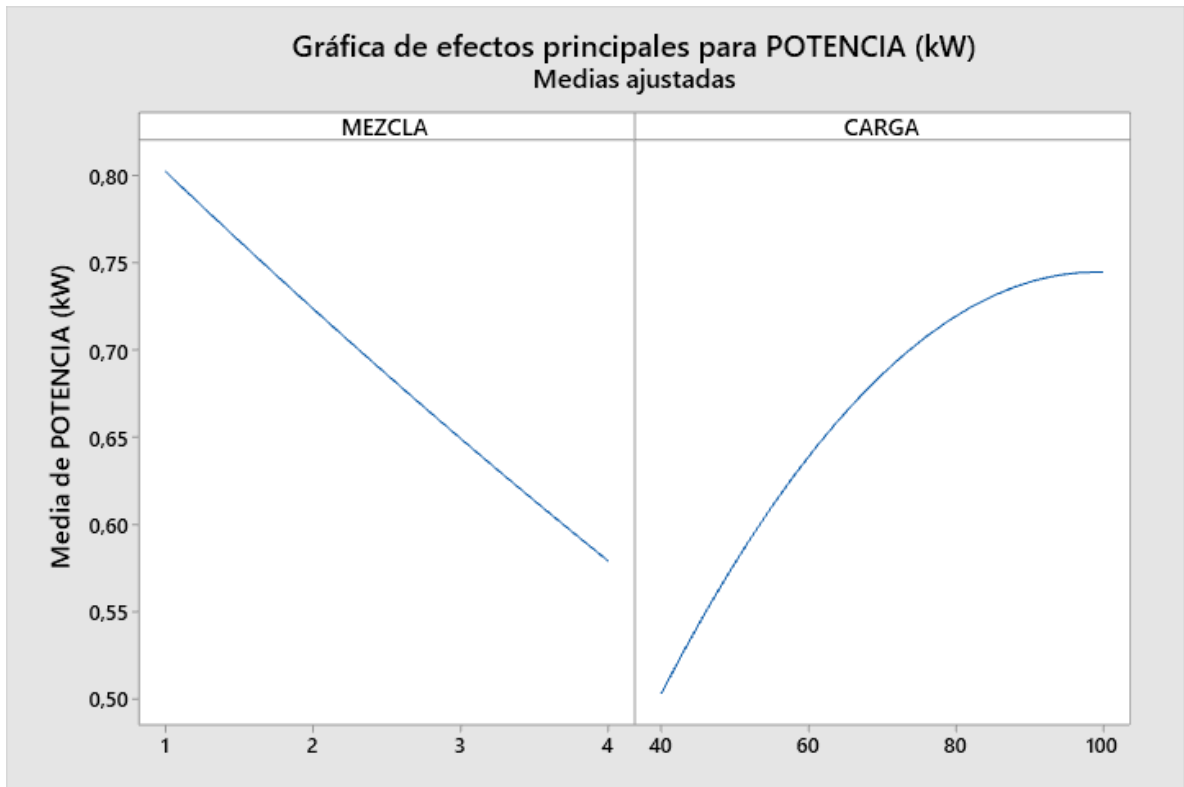
Fuente. Autor del proyecto.

La Potencia más alta fue la prueba con solo Diésel para la carga del 100% fue de 0,98 kW seguido de la sustitución 95 D – 5 GNV con una potencia de 0,88 kW y la más baja de la sustitución 80 D – 20 GNV de 0,63%.

Los valores de la sustitución 95 D – 5 GNV logran acercarse a la del Diésel con el 80% y el 60% de la carga, por debajo del 60% los valores de la potencia se alejan al valor más alto de las pruebas con diésel siendo de 0,33 kW para la carga del 20%

En la figura 20 se encuentran las gráficas de Potencia vs mezcla y Potencia vs carga realizadas con el software Minitab de la universidad libre.

Figura 20. Potencia vs mezcla / Potencia Vs Carga

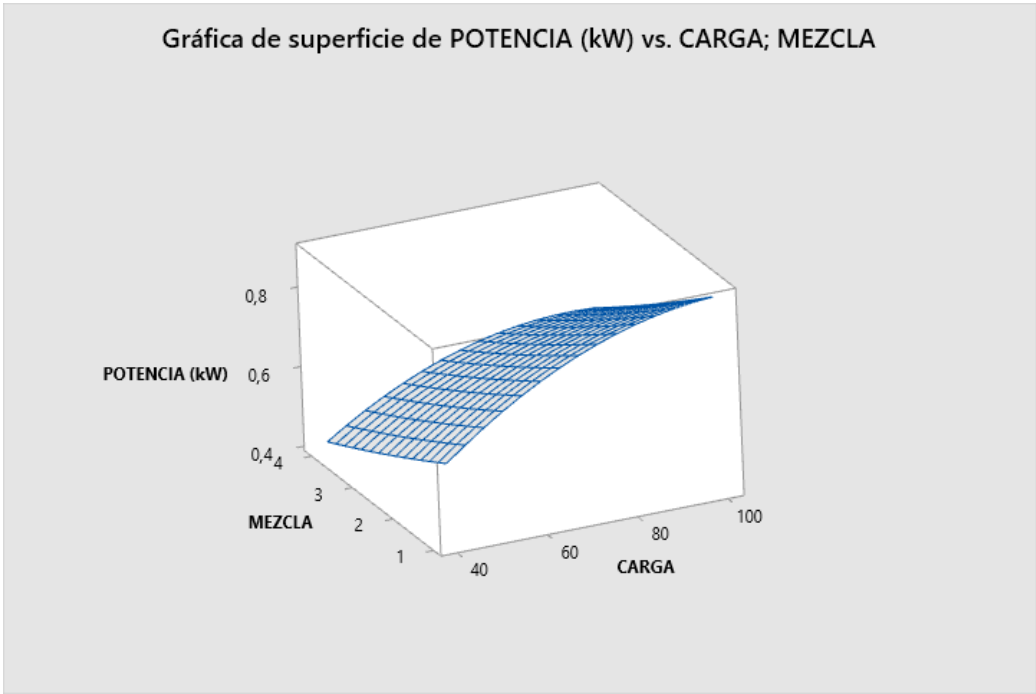


Fuente. Autor del proyecto (Minitab, Universidad Libre)

Se puede ver que a medida que aumenta la cantidad de GNV en la sustitución la Potencia comienza a caer siendo la mezcla 1 (95% D – 5% GNV) la que obtiene la potencia más alta de 0,8 kW, mientras que la potencia aumenta a medida que aumenta la carga siendo la del 100% la más alta.

La figura 21 muestra la gráfica del comportamiento de la superficie de respuesta para la Potencia Vs la carga y la mezcla.

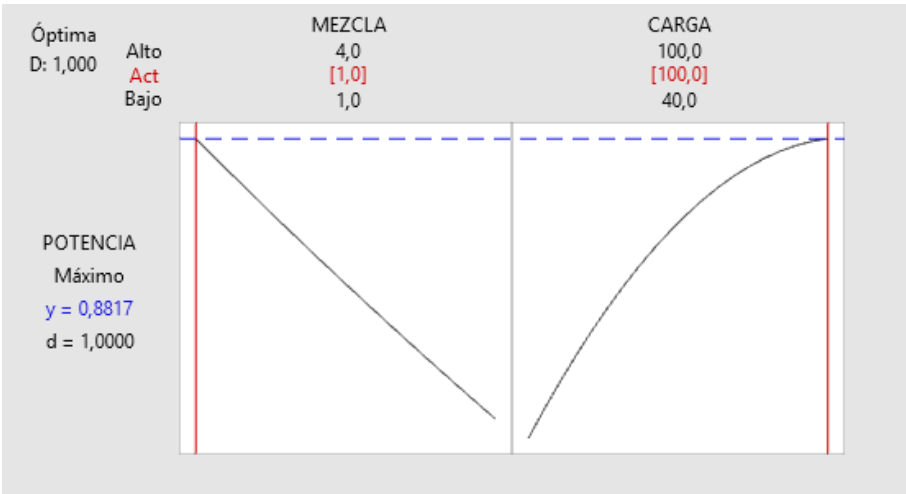
Figura 21. Gráfica de superficie de respuesta de Potencia vs Carga; Mezcla



Fuente. Autor del proyecto (Minitab, Universidad Libre)

La Potencia máxima se encuentra en la mezcla 1 (95% D – 5% GNV) y al 100% de la carga siendo de 0,88 kW. Para poder ver mejor estos resultados, se ha utilizado la herramienta de optimización de respuesta en Minitab que se muestra en la figura 22.

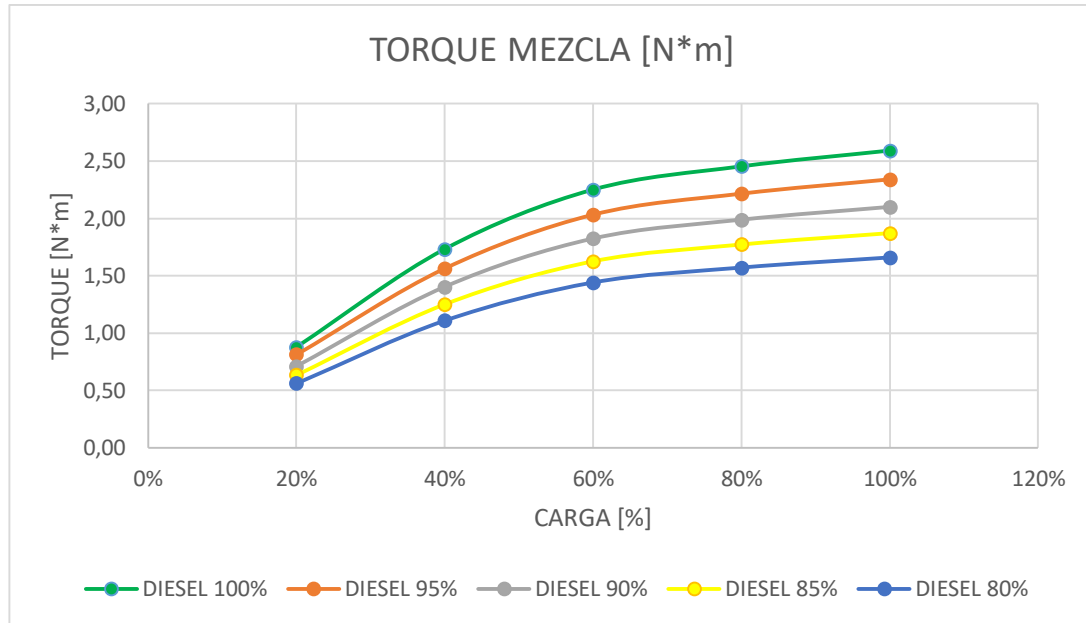
Figura 22. Optimización de la respuesta de Potencia [kW]



Fuente. Autor del proyecto (Minitab, Universidad Libre)

La figura 23 muestra las curvas características de Torque con la sustitucion de Diesel – GNV a diferentes cargas y porcentajes de la mezcla.

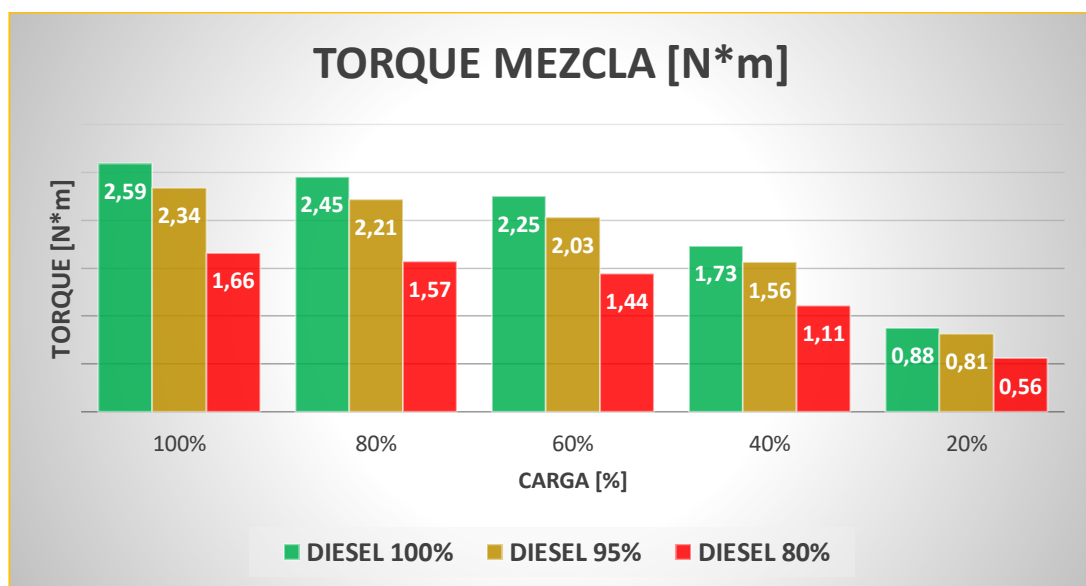
Figura 23. Curvas características de Torque para la sustitución de Diésel - GNV



Fuente. Autor del proyecto.

El comportamiento de las curvas para el Torque es similar a las de la Potencia, siendo la prueba del Diésel la que obtuvo los resultados mas altos respecto a las pruebas con la sustitución.

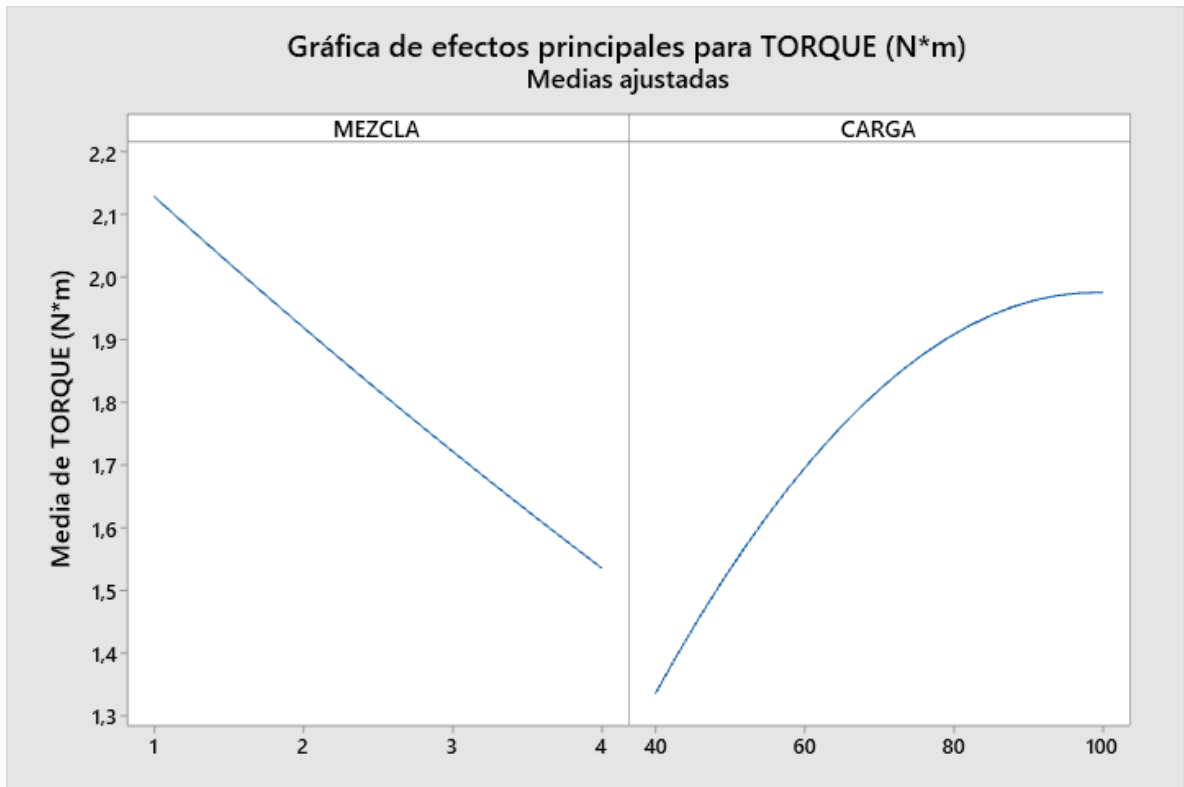
Figura 24. Resultados de las pruebas de Torque



Fuente. Autor del proyecto.

En la figura 25 se encuentran las gráficas de Potencia vs mezcla y Potencia vs carga realizadas con el software Minitab.

Figura 25. Torque vs mezcla / Torque Vs Carga

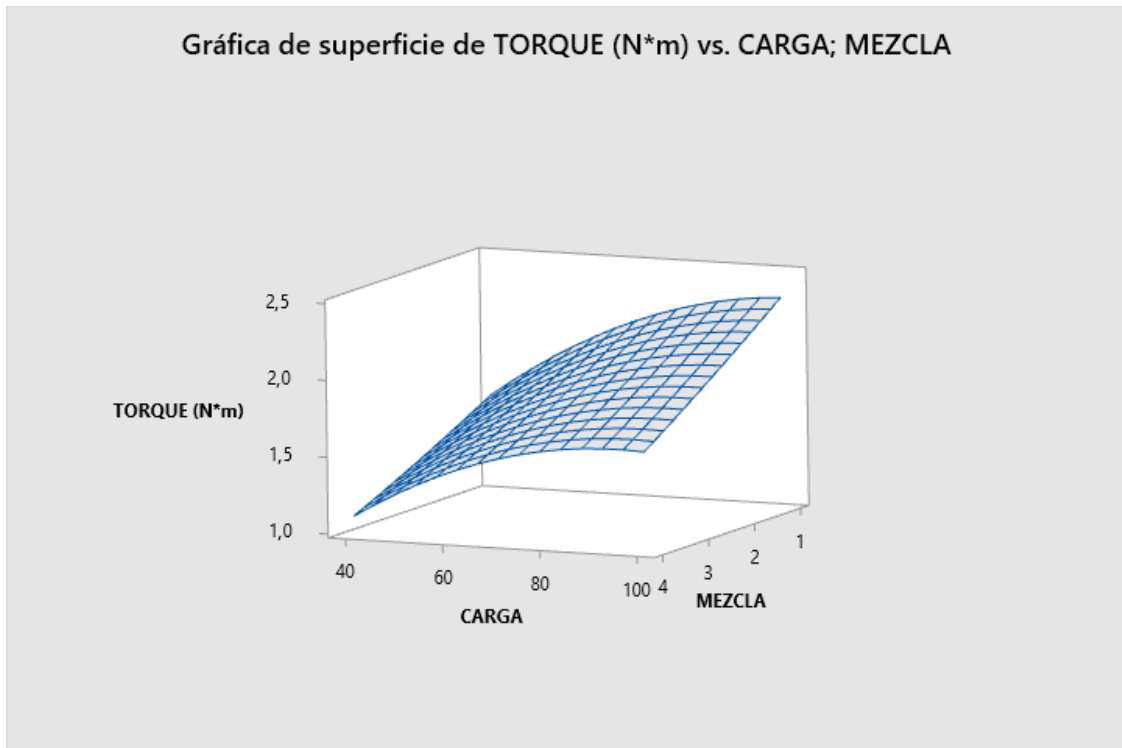


Fuente. Autor del proyecto (Minitab, Universidad Libre)

Se puede ver que a medida que aumenta la cantidad de GNV en la sustitución el Torque comienza a caer siendo la mezcla 1 (95% D – 5% GNV) la que obtiene el torque más alto aproximadamente de 2,1 N*m, mientras que el torque aumenta a medida que aumenta la carga siendo la del 100% la más alta.

La figura 26 muestra la gráfica del comportamiento de la superficie de respuesta para el Torque Vs la carga y la mezcla.

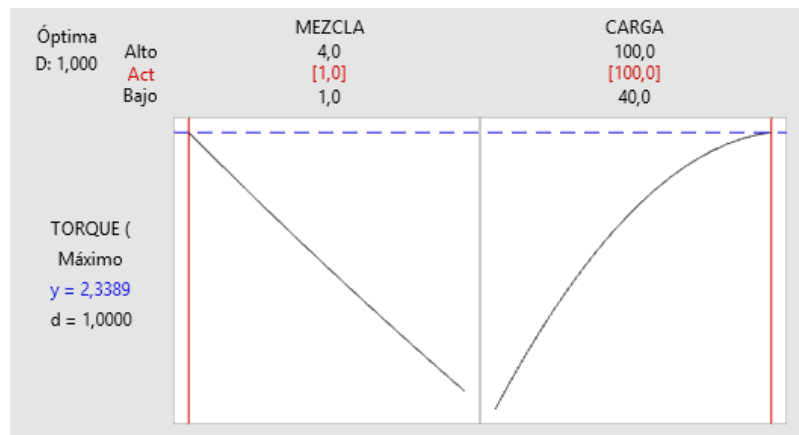
Figura 26. Gráfica de superficie de respuesta del Torque vs Carga; Mezcla



Fuente. Autor del proyecto (Minitab, Universidad Libre)

El Torque máximo se encuentra en la mezcla 1 (95% D – 5% GNV) y al 100% de la carga siendo de 2,34 N*m. Para poder ver mejor estos resultados, se ha utilizado la herramienta de optimización de respuesta en Minitab que se muestra en la figura 27.

Figura 27. Optimización de la respuesta de Torque [N*m]

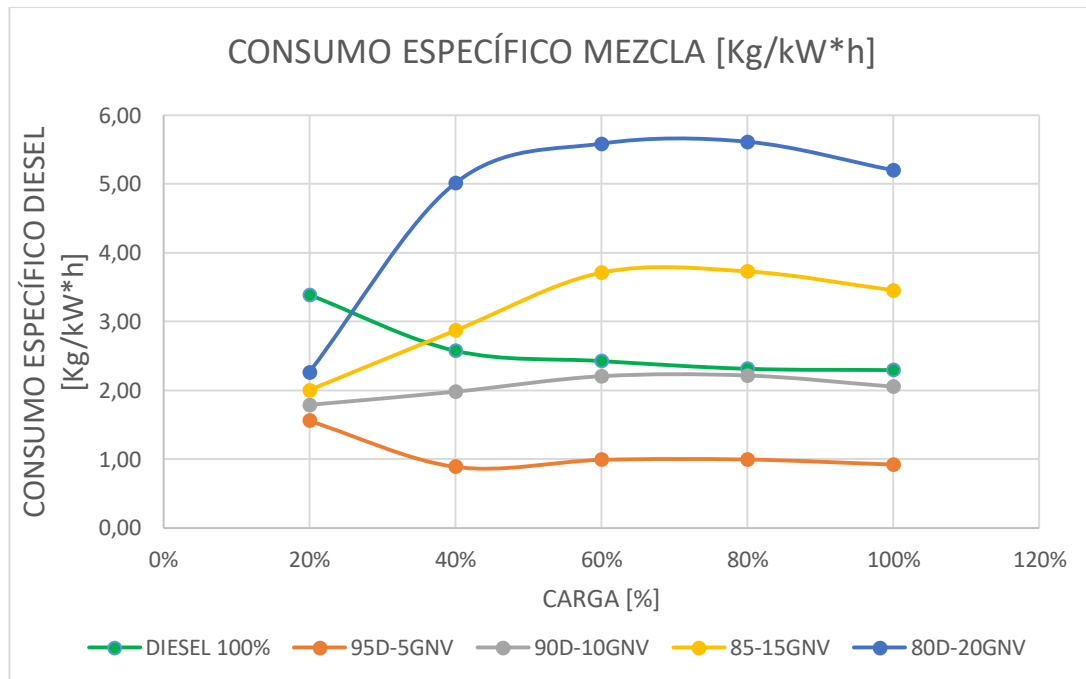


Fuente. Autor del proyecto (Minitab, Universidad Libre)

El valor más alto del torque fue de 2,59 N-m para la prueba del Diésel y de 2,34 N-m para el valor más alto de la sustitución 95% D – 5% GNV. El valor más bajo fue de 1,66 N-m para la mezcla 80% D – 20% GNV para el 100% de la carga.

Por ultimo en la figura 28 y 29 se encuentran graficados los valores para los resultados del BSFC (consumo especifico de combustible al freno).

Figura 28. . Curvas características de Consumo especifico de combustible para la sustitución Diésel - GNV



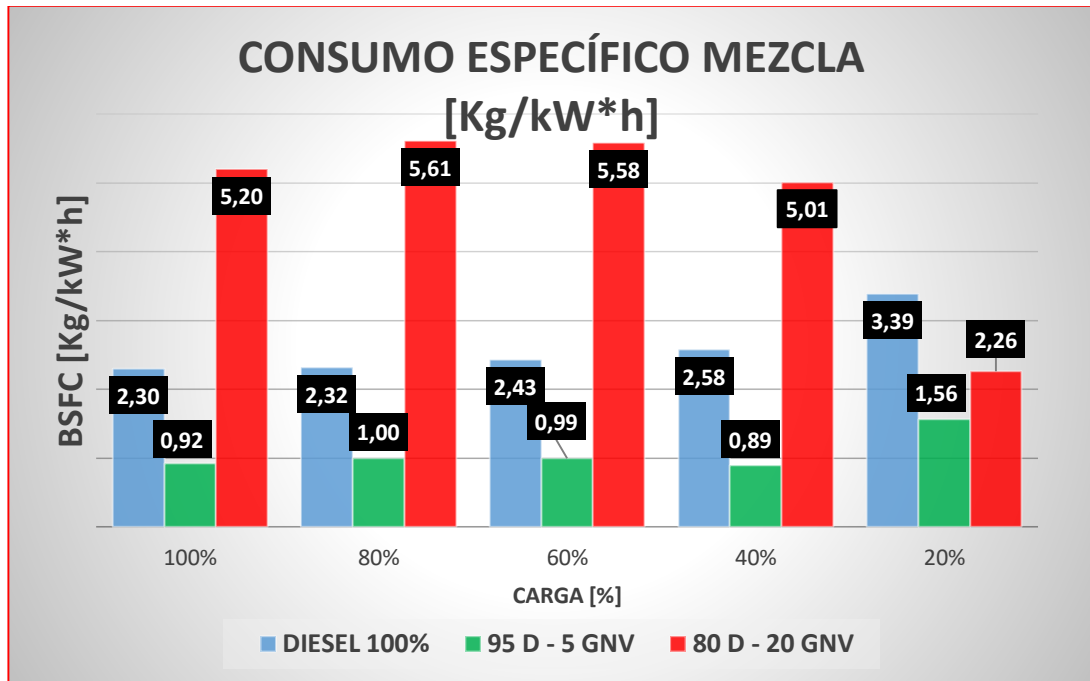
Fuente. Autor del proyecto.

La sustitución 80% D – 25% tiene un consumo de combustible más alto que el de la prueba con únicamente Diésel al igual que la mezcla 85% D – 15%. Esto se debe a que el motor tiene que suplir la masa de Diésel al agregarle GNV y esto hace que el consumo se incremente.

Por otro lado, las sustituciones 95% GNV y 5% GNV y 90% GNV y 10% GNV tiene un consumo incluso menor que el de la prueba con 100%.

En la figura 28 se logran visualizar los resultados de las pruebas con Diésel y las de la sustitución, siendo la columna de rojo la sustitución de 80% D – 25% GNV con los valores más altos de consumo y la columna verde los valores más bajos de la sustitución 95% GNV y 5% GNV comparados con el BSFC del Diésel al 100% de color azul.

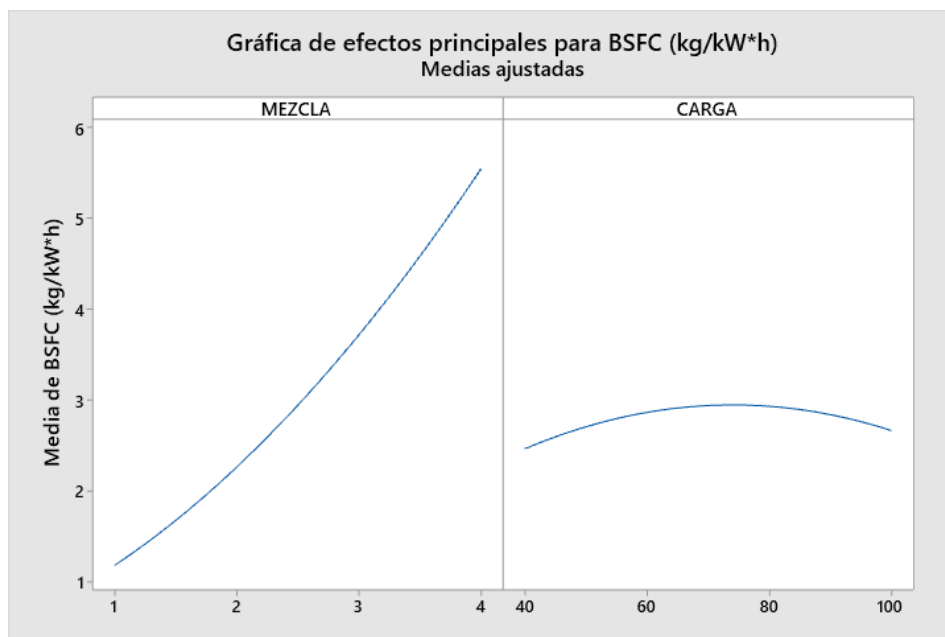
Figura 29. Resultados de las pruebas del BSFC



Fuente. Autor del proyecto.

En la figura 30 se encuentran las gráficas de BSFC vs mezcla y BSFC vs carga realizadas con el software Minitab.

Figura 30. BSFC vs mezcla / BSFC Vs Carga

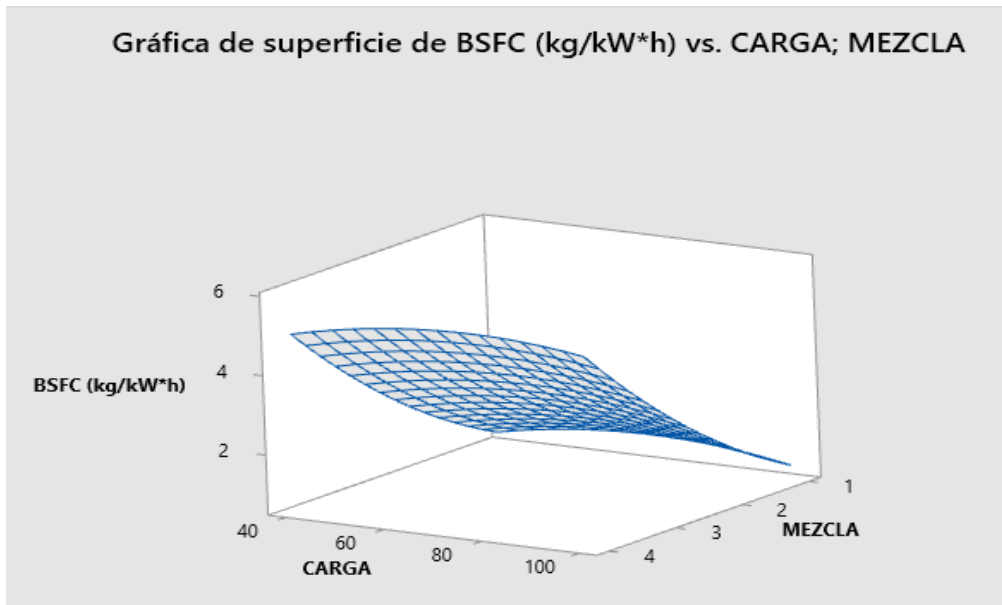


Fuente. Autor del proyecto (Minitab, Universidad Libre)

Se puede ver que a medida que aumenta la cantidad de GNV en la sustitución el BSFC comienza a aumentar siendo la mezcla 4 (80% D – 20% GNV) la que obtiene el BSFC más alto aproximadamente de $5,5 \frac{Kg}{kW \cdot h}$ y el más bajo en la mezcla 1 (95% D – 5% GNV) aproximadamente de $1 \frac{Kg}{kW \cdot h}$.

La figura 31 muestra la gráfica del comportamiento de la superficie de respuesta para el BSFC Vs la carga y la mezcla.

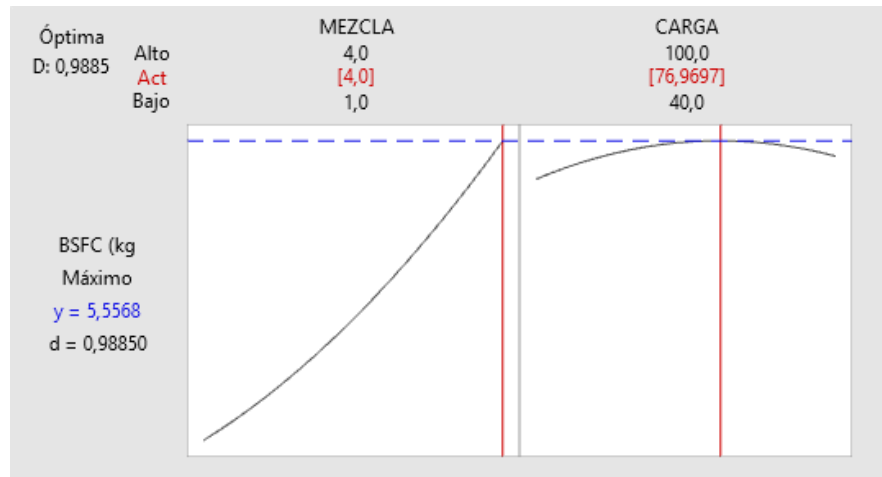
Figura 31. Gráfica de superficie de respuesta del BSFC vs Carga; Mezcla.



Fuente. Autor del proyecto (Minitab, Universidad Libre)

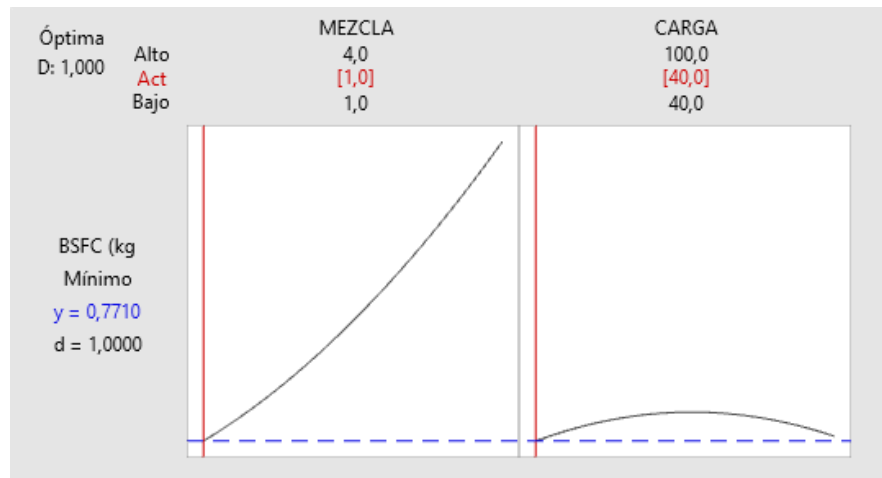
El BSFC máximo se encuentra en la mezcla 4 (80% D – 20% GNV) y al 100% de la carga siendo de $5,56 \frac{Kg}{kW \cdot h}$ y el mínimo en la mezcla 1 al 40% de la carga siendo de $0,77 \frac{Kg}{kW \cdot h}$. Para poder ver mejor estos resultados, se ha utilizado la herramienta de optimización de respuesta en Minitab que se muestra en la figura 32 y 33 respectivamente.

Figura 32. Optimización de la respuesta máxima del BSFC [$\frac{Kg}{kW \cdot h}$]



Fuente. Autor del proyecto (Minitab, Universidad Libre)

Figura 33. Optimización de la respuesta mínima del BSFC [$\frac{Kg}{kW \cdot h}$]



Fuente. Autor del proyecto (Minitab, Universidad Libre)

El BSFC para la prueba con Diésel fue de $2,3 \frac{Kg}{kW \cdot h}$ a la carga del 100% y de $3,39 \frac{Kg}{kW \cdot h}$ para la carga del 20%.

Para la sustitución 95% D – 5% GNV el BSFC fue de aproximadamente $1 \frac{Kg}{kW \cdot h}$ para las cargas desde el 100% hasta el 40% y de $1,6 \frac{Kg}{kW \cdot h}$ para la carga del 20%.

Por ultimo para la sustitución de 80% D – 20% GNV fue de más de $5 \frac{Kg}{kW \cdot h}$.

11 CONCLUSIONES

1. La Potencia máxima obtenida en las pruebas con sustitución Diésel – GNV fue la de la mezcla 95 D – 5 GNV siendo de 0,88 kW al 100% de la carga. Este valor de Potencia es 10,2% menos que el de la prueba con Diésel que fue de 0,98 kW al 100% de la carga debido a que la energía entregada es directamente proporcional a la masa del combustible, lo cual hace que el motor pierda Potencia ya que el porcentaje de Diésel es menor.
2. El valor más alto del torque fue de 2,59 N-m para la prueba del Diésel y de 2,34 N-m para el valor más alto de la sustitución 95% D – 5% GNV. El valor más bajo fue de 1,66 N-m para la mezcla 80% D – 20% GNV para el 100% de la carga. Así que el resultado más alto de la sustitución está 11% por debajo del valor de la prueba del Diésel al 100% de la carga, al igual que ocurre con la Potencia, en las sustituciones hay menor masa de combustible Diésel y el GNV no alcanza a compensar esas pérdidas entregando un Torque más bajo que la base Diésel 100%.
3. El BSFC mejoró un 60% en la sustitución 95% D – 5% GNV ($0,92 \frac{Kg}{kW*h}$) y un 10% con 90% D - 10% GNV ($2,05 \frac{Kg}{kW*h}$) al 100% de la carga comparado con el valor mínimo de la prueba con Diésel que fue de $2,3 \frac{Kg}{kW*h}$ al 100% de la carga. Las otras dos pruebas con 80% D – 20% GNV y 85% D – 15% GNV tienen valores de BSFC de más de $3 \frac{Kg}{kW*h}$.
4. Las pruebas de las sustituciones con 80% D – 20% GNV y 85% D – 15% GNV resultados bajos en Potencia, Torque y BSFC comparados con los valores de la prueba con únicamente Diésel, lo cual no las hace viables si se quiere implementar una sustitución que sea mejor o igual que el Diésel. Esto se debe a que el motor con porcentajes mayores al 10% de GNV requiere consumir más masa de Diésel debido a que el GNV ocupa un gran volumen y entrega poca masa en la cámara de combustión, aumentando el Consumo y entregando valores bajos de Potencia y Torque.
5. La sustitución 95% D – 5% GNV es adecuada para usarse en reemplazo a la base Diésel actual, a pesar de que el Torque y la Potencia están 10% por debajo de la del Diésel, el consumo mejoro en un 60% con respecto al Diésel.

11.1 Recomendaciones

- Para trabajos futuros se aconseja realizar pruebas con mezclas por encima del 20% de GNV para analizar las variaciones en el comportamiento de los parámetros de desempeño del motor.
- De igual forma se aconseja realizar pruebas a diferentes RPM.

12 ANEXOS

En el Anexo a se encuentran los resultados obtenidos de las pruebas con únicamente Diésel como combustible, únicamente GNV como combustible y los resultados de las pruebas con la sustitución Diésel – GNV como combustible

12.1 Anexo A

Tabla 16. Resultados obtenidos de la prueba con combustible DIESEL

RESULTADOS PRUEBA CON COMBUSTIBLE DIESEL									
DIESEL	POT	VOL	t	Caudal	ρ	Flujo de masa	BSFC	TORQUE	CARGA
	kW	m ³	s	m ³ /s	kg/m ³	kg/s	Kg/KW*h	Nm	
95%	1,E+00	4,E-05	60	7,3E-07	850	6,E-04	2,29718	2,591	100%
95%	9,E-01	4,E-05	60	7,0E-07	850	6,E-04	2,31578	2,454	80%
95%	8,E-01	4,E-05	60	6,7E-07	850	6,E-04	2,42788	2,251	60%
95%	7,E-01	3,E-05	60	5,5E-07	850	5,E-04	2,57655	1,733	40%
95%	3,E-01	2,E-05	60	3,7E-07	850	3,E-04	3,38768	0,879	20%
90%	8,E-01	4,E-05	60	6,6E-07	850	6,E-04	2,55243	2,099	100%
90%	7,E-01	4,E-05	60	6,3E-07	850	5,E-04	2,57308	1,987	80%
90%	7,E-01	4,E-05	60	6,1E-07	850	5,E-04	2,69765	1,823	60%
90%	5,E-01	3,E-05	60	5,0E-07	850	4,E-04	2,86283	1,403	40%
90%	3,E-01	2,E-05	60	3,5E-07	850	3,E-04	3,97321	0,712	20%
85%	7,E-01	4,E-05	60	6,2E-07	850	5,E-04	2,70257	1,872	100%
85%	7,E-01	4,E-05	60	6,0E-07	850	5,E-04	2,72444	1,773	80%
85%	6,E-01	3,E-05	60	5,7E-07	850	5,E-04	2,85633	1,626	60%
85%	5,E-01	3,E-05	60	4,7E-07	850	4,E-04	3,03123	1,252	40%
85%	2,E-01	2,E-05	60	3,5E-07	850	3,E-04	4,45439	0,635	20%
80%	6,E-01	4,E-05	60	5,9E-07	850	5,E-04	2,87148	1,658	100%
80%	6,E-01	3,E-05	60	5,6E-07	850	5,E-04	2,89472	1,570	80%
80%	5,E-01	3,E-05	60	5,4E-07	850	5,E-04	3,03486	1,441	60%
80%	4,E-01	3,E-05	60	4,4E-07	850	4,E-04	3,22068	1,109	40%
80%	2,E-01	2,E-05	60	3,5E-07	850	3,E-04	5,02859	0,562	20%

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 17. Resultados obtenidos de la prueba con combustible GNV

RESULTADOS PRUEBA CON COMBUSTIBLE GNV									
DIESEL	POT	VOL	t	Caudal	ρ	Flujo de masa	BSFC	TORQUE	CARGA
	kW	m ³	s	m ³ /s	kg/m ³	kg/s	Kg/KW*h	Nm	
95%	2,E-03	2,E-02	60	3,1E-04	0,743	2,E-04	388,78402	0,006	100%
95%	2,E-03	2,E-02	60	3,2E-04	0,743	2,E-04	374,33814	0,006	80%
95%	2,E-03	2,E-02	60	2,9E-04	0,743	2,E-04	356,81890	0,006	60%
95%	2,E-03	1,E-02	60	2,0E-04	0,743	1,E-04	340,87610	0,004	40%
95%	9,E-04	1,E-02	60	1,8E-04	0,743	1,E-04	554,25749	0,002	20%
90%	9,E-03	4,E-02	60	6,2E-04	0,743	5,E-04	194,39201	0,023	100%
90%	9,E-03	4,E-02	60	6,3E-04	0,743	5,E-04	187,16907	0,024	80%
90%	9,E-03	3,E-02	60	5,8E-04	0,743	4,E-04	178,40945	0,023	60%
90%	6,E-03	2,E-02	60	4,0E-04	0,743	3,E-04	170,43805	0,017	40%
90%	3,E-03	1,E-02	60	1,8E-04	0,743	1,E-04	138,56437	0,009	20%
85%	2,E-02	6,E-02	60	9,3E-04	0,743	7,E-04	129,59467	0,051	100%
85%	2,E-02	6,E-02	60	9,5E-04	0,743	7,E-04	124,77938	0,054	80%
85%	2,E-02	5,E-02	60	8,7E-04	0,743	6,E-04	118,93963	0,052	60%
85%	1,E-02	3,E-02	60	5,2E-04	0,743	4,E-04	97,95290	0,037	40%
85%	8,E-03	1,E-02	60	1,8E-04	0,743	1,E-04	61,58417	0,021	20%
80%	3,E-02	7,E-02	60	1,2E-03	0,743	9,E-04	97,19600	0,090	100%
80%	4,E-02	8,E-02	60	1,3E-03	0,743	9,E-04	93,58454	0,096	80%
80%	3,E-02	7,E-02	60	1,2E-03	0,743	9,E-04	89,20472	0,092	60%
80%	3,E-02	5,E-02	60	8,0E-04	0,743	6,E-04	85,21902	0,066	40%
80%	1,E-02	1,E-02	60	1,8E-04	0,743	1,E-04	34,64109	0,037	20%

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 18. Resultados obtenidos de la prueba con la sustitución Diésel – GNV

RESULTADOS PRUEBA CON COMBUSTIBLE GNV									
DIESEL	POT	VOL	t	Caudal	ρ	Flujo de masa	BSFC	TORQUE	CARGA
	kW	m3	s	m ³ /s	kg/m ³	kg/s	Kg/KW*h	Nm	
95%	9,E-01	2,E-02	60	3,0E-04	807,53715	2,E-01	0,923	2,339	100%
95%	8,E-01	2,E-02	60	3,1E-04	807,53715	3,E-01	0,996	2,214	80%
95%	8,E-01	2,E-02	60	2,8E-04	807,53715	2,E-01	0,992	2,032	60%
95%	6,E-01	1,E-02	60	2,0E-04	807,53715	2,E-01	0,890	1,564	40%
95%	3,E-01	1,E-02	60	1,8E-04	807,53715	1,E-01	1,560	0,815	20%
90%	8,E-01	4,E-02	60	6,1E-04	765,0743	5,E-01	2,055	2,099	100%
90%	7,E-01	4,E-02	60	6,2E-04	765,0743	5,E-01	2,218	1,987	80%
90%	7,E-01	3,E-02	60	5,7E-04	765,0743	4,E-01	2,207	1,823	60%
90%	5,E-01	2,E-02	60	3,9E-04	765,0743	3,E-01	1,981	1,403	40%
90%	3,E-01	1,E-02	60	1,8E-04	765,0743	1,E-01	1,788	0,712	20%
85%	7,E-01	5,E-02	60	9,1E-04	722,61145	7,E-01	3,454	1,872	100%
85%	7,E-01	6,E-02	60	9,3E-04	722,61145	7,E-01	3,728	1,773	80%
85%	6,E-01	5,E-02	60	8,5E-04	722,61145	6,E-01	3,711	1,626	60%
85%	5,E-01	3,E-02	60	5,1E-04	722,61145	4,E-01	2,870	1,252	40%
85%	2,E-01	1,E-02	60	1,8E-04	722,61145	1,E-01	2,004	0,635	20%
80%	6,E-01	7,E-02	60	1,2E-03	680,1486	8,E-01	5,198	1,658	100%
80%	6,E-01	7,E-02	60	1,2E-03	680,1486	8,E-01	5,611	1,570	80%
80%	5,E-01	7,E-02	60	1,1E-03	680,1486	8,E-01	5,584	1,441	60%
80%	4,E-01	5,E-02	60	7,8E-04	680,1486	5,E-01	5,010	1,109	40%
80%	2,E-01	1,E-02	60	1,8E-04	680,1486	1,E-01	2,263	0,562	20%

Fuente. Autor del proyecto.

REFERENCIAS

- J. Heywood. (1988). *Internal Combustion Engine fundamentals*. New York: Mc Graw Hill.
- W, Pulkrabek. (2007). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. New Jersey: Prentice Hall.
- ACP. (2017). Mercado de combustibles en Colombia. 1-4.
- Agudelo, John. (2002). *Desarrollo de un modelo para el dimensionamiento de mezcladores aire-gas natural para motores*. Antioquia: Universidad de Antioquia.
- Arango, J. (2009). Calidad de los combustibles en Colombia. *Revista de Ingeniería*.
- Balance de Gas Natural en Colombia 2016-2025. (2016). UPME.
- Bedoya, C. (2007). *Efecto del Grado de Carga y la Cantidad del Combustible Piloto en el Comportamiento Mecánico Ambiental de un Motor Dual Diésel-Biogás Para Generación de Electricidad*. Antioquia: Universidad de Antioquia.
- Camargo, J., Herrera, K. (2018). EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE UN MOTOR GENERADOR ACOPLADO A UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO CON Y SIN INTERCAMBIO DE CALOR, PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA ZONA DE APROVECHAMIENTO DEL JARDÍN BOTÁNICO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ. *Universidad Libre de Colombia*.
- Carlos, A., Forero, N., Arango, J., Sierra, F. (2014). Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kWe en modo diésel-gas licuado del petróleo. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Chica, F., Espinoza, F., Rivera, N. (s.f). Gas licuado de petróleo como combustible alternativo para motores diésel con finalidad de reducir la contaminación del aire. *INGENIUS*, 2.
- Coronado, B. (2017). *Análisis comparativo del rendimiento de un motor con sistema dual gasolina/GLP*. Trujillo, Perú: Universidad Cesar Vallejo.
- DANE. (2018). *Importaciones de combustibles líquidos en Colombia*. DANE.
- Ecopetrol. (s.f). *Diésel corriente B2/B4*. s.f.
- EQUIVALENCIA ENERGÉTICA CONSUMO VEHÍCULO OPERANDO CON GNV Y DIÉSEL CONVENCIONAL. (s.f). *Universidad Nacional de Colombia*.
- Eslava, A. (2014). GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA OPERACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA EN MODO DUAL CON GAS LICUADO DE PETRÓLEO E HIDRÓGENO. *UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA*.
- ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DEL GAS NATURAL EN EL PUNTO DE ENTRADA DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSPORTE DE GAS. (2008). *Comisión de Regulación de Energía y Gas*.

- Forero, Carlos. (2014). *Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kWe en modo diesel-gas licuado de petróleo*. La Habana: Ingeniería Mecánica vol.17 no.3.
- (s.f). *Gasoléo*. Ecuador: EcuRed.
- Giraldo, L., Behrentz, E. (s.f). Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes. *Universidad de los Andes*, 1.
- Henry, E. (2007). Modelo predictivo de combustión de mezclas de gas natural en motores de encendido por chispa (MECH). *Revista de Ingeniería E Investigación.*, 1.
- Ibarra, T. (2009). El Diesel para autotransporte en Mexico, Situación actual y prospectiva. *EL COTIDIANO*, 65-74.
- Jhon, R. Ricardo, M. (2002). Desarrollo de un modelo para el dimensionamiento de mezcladores aire-gas natural para motores. *Facultad de ingeniería-Universidad de Antioquia.*, 2.
- Jovaj, S. (1982.). *Motores de Automóvil*. Moscú.
- Mantilla, Juan. (2010). *Análisis comparativo del desempeño y emisiones de un motor*. Ingeniería e investigación VOL 30 .
- Matienzo, Gabriel. (2017). *Evaluación experimental del rendimiento de un motor TOYOTA 5A-FE convertido a GNV en la Paz*. La paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.
- Maurya, R., Mishra, P. (2017). Parametric investigation on combustion and emissions characteristics of a dual fuel (natural gas port injection and diesel pilot injection) engine using 0-D SRM and 3D CFD approach. *ELSIVIER*.
- Mercado de combustibles en Colombia. (2017). *ACP*.
- Mercedes, Yolanda., Hernández, Andrés. (2014). Caracterización de un motor de combustión interna con dos tipos de combustible. *Instituto Mexicano del Transporte (IMT)* .
- Montenegro, Carlos. (2011). *Existencia de poder de mercado en la industria minorista de Gas Natural Vehicular – GNV. Estudio de caso para un área metropolitana en Colombia*. Medellín : Universidad EAFIT.
- Ormeño, Victor. (2015). *El gas natural y sus diferencias con el GLP*. Perú: Teps Group S.A.C.
- Orrego, M., Castaño, J. (2015). APLICACIÓN DEL MODELO CASI IDEAL DE DEMANDA AL MERCADO DE COMBUSTIBLES EN EL SECTOR DE TRANSPORTE DE COLOMBIA. *UNIVERSIDAD EAFIT*.
- Pulkrabek, W. (2007). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. New Jersey: Prentice Hall.
- Quintero, C., Moreno, Saul. (2014). *CARACTERIZACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN MOTOR DIESEL A PARTIR DE LA IMPLEMENTACIÓN DE DIFERENTES MEZCLAS BIOCOMBUSTIBLE/DIESEL*. Bogotá D.C: Universidad Santo Tomás.
- R. López. (s.f.). *EVALUACIÓN DEL ESTADO DE MOTORES DE VEHÍCULOS A GASOLINA MODIFICADOS PARA FUNCIONAR A GLP* . Arequipa, Perú: Universidad Católica San Pablo .

R. Lopez., J. Milón. (s.f.). EVALUACION DEL ESTADO DE MOTORES DE VEHICULOS A GASOLINA MODIFICADOS PARA FUNCIONAR A GLP. PERÚ.

Soorya Tejomoortula. (06 de Diciembre de 2019). China representará el 44% de la capacidad de refinación de petróleo crudo de Asia para 2023. *Petroquímica. Petróleo, gas, química & energía*.

UPME. (2017). *Balance de Gas Natural en Colombia 2016-2025*. s.f: Unidad de Planeación Minero Energética.

Valencia, J., Arturo, M., Acosta, L., Obando, D. (2016). PROYECCION DE DEMANDA COMBUSTIBLES LIQUIDOS EN COLOMBIA. *UPME*, 4.

Valencia, J. (2017). CADENA DEL GAS LICUADO DEL PETROLEO (GLP). *UPME*, 10.

Valencia, J. A. (2016). PROYECCION DE DEMANDA DE COMBUSTIBLES EN COLOMBIA. *UMPE*, 14-15.

VEHICULAR, L. D. (s.f). ANEXO A. *Universidad Nacional de Colombia*.